



**TUGAS AKHIR - TM141585**

**PERANCANGAN SISTEM *INTERFACE* DAN  
*SYSTEM IDENTIFICATION TWIN ROTOR*  
*HOVERING SYSTEM***

**MUHAMMAD RIFQI FARIZ**  
**NRP 2112 100 130**

**Dosen Pembimbing**  
**Dr.Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.Sc.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2016**



**FINAL PROJECT - TM141585**

# **DESIGN OF SYSTEM INTERFACE AND SYSTEM IDENTIFICATION OF TWIN ROTOR HOVERING SYSTEM**

**MUHAMMAD RIFQI FARIZ**  
**NRP 2112 100 130**

**Academic Supervisor**  
**Dr.Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.Sc.**

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**Faculty of Industrial Technology**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2016**

## LEMBAR PENGESAHAN

### PERANCANGAN SISTEM *INTERFACE* DAN *SYSTEM IDENTIFICATION* TWIN ROTOR HOVERING SYSTEM

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik  
pada

Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Disusun oleh:

**MUHAMMAD RIFQI FARIZ**

Nrp. 2112 100 130

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr.Eng. Unggul W., S.T., M.Eng.Sc  
(NIP. 19780511 2001121001)

(Pembimbing)

2. Ir. Bambang P., M.Sc. Eng.  
(NIP. 19691203 1994031001)

(Penguji 1)

3. Arif Wahjudi S.T., M.T., Ph.D.  
(NIP. 19730322 2001121001)

(Penguji 2)

4. Moch. Solichin, S.T., M.T.  
(NIP. 19890817 2015041003)

(Penguji 3)

**SURABAYA  
JULI 2016**

# **PERANCANGAN SISTEM *INTERFACE* DAN SYSTEM IDENTIFICATION TWIN ROTOR HOVERING SYSTEM**

**Nama Mahasiswa** : Muhammad Rifqi Fariz  
**NRP** : 2112100130  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr.Eng. Unggul W, ST., M.Eng.Sc

## **ABSTRAK**

Sistem kontrol atau sistem pengendalian merupakan suatu sistem untuk mengatur variabel masukan agar keluaran dari sistem tersebut sesuai dengan apa yang diinginkan. Namun untuk membuat sistem pengendalian diperlukan model matematis dari sistem dinamik alat yang akan dikendalikan. Ada dua cara untuk mendapatkan model matematis, yaitu dengan cara teoritis dan dengan cara eksperimen, *System Identification*. *System Identification* atau Identifikasi Sistem merupakan metode untuk menentukan model matematis dari sistem dinamik suatu benda berdasarkan pengukuran data yang dilakukan.

Pada penelitian ini dilakukan identifikasi sistem *Twin Rotor Hovering System* guna mengetahui model matematis dari sistem dinamik alat tersebut. Parameter sistem yang dibutuhkan dalam proses identifikasi sistem didapatkan dari hasil pengukuran posisi *Twin Rotor Hovering System*. Langkah sistematis yang dilakukan pada penelitian ini adalah studi literatur dan lapangan demi menunjang dasar teori dari penelitian mengenai identifikasi sistem, kemudian identifikasi dan perumusan masalah, penetapan tujuan penelitian, perancangan dan perakitan sistem *interface*, pembuatan program di arduino, verifikasi program, pengambilan data, pengolahan data pengukuran, dan yang terakhir adalah pengambilan kesimpulan.

Pada penelitian ini diperoleh bahwa gaya angkat rotor dan arus listrik yang masuk pada ESC berbanding lurus dengan *input* sinyal digital pada ESC. Persentase *best fits* dari *model output* hasil simulasi dengan data eksperimen untuk input variasi pertama yaitu 63,26% (TF1). Sedangkan persentase *best fits* dari *model output* hasil simulasi dengan data eksperimen untuk *input* variasi kedua yaitu 92,67% (TF2). Model ARX hasil simulasi yang dipilih yaitu TF2, dengan persentase *best fits* paling besar yaitu 92,67%.

**Kata-kata kunci** : *Twin Rotor Hovering System, Arduino, Best Fits, System Identification, Sistem Pengendalian, ARX, Model Output, ESC, Interface*

# **DESIGN OF SYSTEM INTERFACE AND SYSTEM IDENTIFICATION OF TWIN ROTOR HOVERING SYSTEM**

**Name** : Muhammad Rifqi Fariz  
**NRP** : 2112100130  
**Department** : Mechanical Engineering  
**Advisor** : Dr.Eng. Unggul W., ST., M.Eng.Sc

## **ABSTRACT**

*Control systems are system to adjust input variable in order to set output variable corresponding with what we wanted. The development of control system required mathematical model of a dynamical system instruments which will be controlled. There are two ways to obtain a mathematical model, specifically with theoretical or experimental (System Identification). System identification is a method to determine the mathematical model of the dynamical system based on the measurement data.*

*This research was conducted on the system identification of Twin Rotor Hovering System to figure out the mathematical model of the dynamical systems. The system parameters required in the process of system identification obtained from the results of the position measurements of a Twin Rotor Hovering System. The systematic steps are undertaken in this research is the study of the literature in order to support the theoretical foundations of the research on the system identification, identification and formulation of the problem, goal setting research, design and assembly of system interfaces, making the program on arduino, verification programs, data capture, measurement data processing, and the last is the retrieval conclusion.*

*In this research was obtained that lift force of the rotor and electric current enters on the ESC is directly proportional to the input digital signal on ESC. The percentage of best fits the output*

*from the model simulated results with experimental data for the first variation input is 63.26% (TF1). While the percentage of best fits the output from the model simulated results with experimental data for the second variation input is 92.67% (TF2). The selected ARX model from the results of simulation is TF2, with the most percentage of best fits is 92,67%.*

**Keywords** : *Twin Rotor Hovering System, Arduino, Best Fits, System Identification, Control Systems, ARX, Model Output, ESC, System Interface*

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xi
BAB I - PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	2
1.3. Tujuan Penelitian .....	2
1.4. Batasan Masalah .....	3
1.5. Manfaat Penelitian .....	3
BAB II - DASAR TEORI .....	5
2.1. Model Matematis .....	5
2.2. <i>System Identification</i> .....	6
2.3. <i>Transfer Function</i> dan <i>State Space</i> .....	7
2.3.1. <i>Transfer Function</i> .....	7
2.3.2. <i>State Space</i> .....	8
2.4. Pengukuran .....	8
2.5. Instrumen .....	9
2.6. <i>Analog to Digital Conversion (A/D)</i> .....	10
2.7. Sensor yang Digunakan .....	11
2.8. Arduino .....	12
2.9. <i>Electronic Speed Control</i> .....	14
2.10. <i>Motor Brushless</i> .....	16
2.11. <i>AC to DC Power Supply</i> .....	17
BAB III - METODOLOGI .....	19
3.1. Diagram Alir Penelitian .....	19
3.2. Langkah-Langkah Penelitian .....	19
3.3. Diagram Alir Penentuan Spesifikasi <i>Power Supply</i> .....	25
3.4. Diagram Alir Pengambilan Data .....	25
3.5. Detail Peralatan Uji .....	25
3.6. Spesifikasi ESC .....	29



3.7.	Spesifikasi Motor <i>Brushless</i> .....	29
3.8.	Spesifikasi Potensiometer .....	30
3.9.	Perhitungan Karakteristik Gaya Angkat Rotor .....	31
3.10.	<i>Free Body Diagram Twin Rotor Hovering System</i> .....	32
BAB IV - ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....		37
4.1.	Contoh Perhitungan Uji Coba Gaya Angkat Rotor .....	37
4.2.	Analisa Karakteristik Antara Gaya Angkat Rotor Dengan Perubahan <i>Input</i> Sinyal Digital ESC.....	37
4.3.	Perhitungan Gaya Angkat <i>Twin Rotor Hovering System</i> .....	40
4.4.	<i>Setting</i> Gaya Angkat Rotor Kanan dan Rotor Kiri.....	41
4.5.	<i>System Identification</i> .....	43
4.5.1.	<i>System Identification</i> Menggunakan Variasi <i>Input</i> Pertama .....	44
4.5.2.	<i>System Identification</i> Menggunakan Variasi <i>Input</i> Kedua .....	49
BAB V - KESIMPULAN DAN SARAN.....		57
DAFTAR PUSTAKA.....		59
<i>Lampiran 1</i> .....		62
<i>Lampiran 2</i> .....		67
<i>Lampiran 3</i> .....		76
<i>Lampiran 4</i> .....		78
<i>Lampiran 5</i> .....		80
BIODATA PENULIS.....		85

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> <i>Transfer Function</i> .....	8
<b>Gambar 2.2</b> Potensiometer sebagai sensor posisi [11] .....	12
<b>Gambar 2.3</b> Bentuk fisik dari ESC [15] .....	15
<b>Gambar 2.4</b> Rotor pada motor DC <i>brushless</i> [16] .....	16
<b>Gambar 2.5</b> (a) Diagram blok DC <i>Power Supply</i> dan (b) rangkaian sederhana DC <i>Power Supply</i> [18] .....	18
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir penelitian.....	20
<b>Gambar 3.2</b> Wiring diagram Twin Rotor Hovering System.....	21
<b>Gambar 3.5</b> Diagram alir pemilihan <i>power supply</i> .....	26
<b>Gambar 3.6</b> Diagram alir pengambilan data karakteristik gaya angkat terhadap input arus listrik .....	27
<b>Gambar 3.7</b> Diagram alir pengambilan data pengukuran sudut <i>Twin Rotor Hovering System</i> .....	28
<b>Gambar 3.8</b> Komponen elektronika yang digunakan pada <i>Twin Rotor Hovering System</i> .....	29
<b>Gambar 3.9</b> Spesifikasi potensiometer yang digunakan [21] ....	30
<b>Gambar 3.10</b> Mekanisme alat uji pengukur gaya angkat rotor ..	31
<b>Gambar 3.11</b> <i>Free body diagram</i> alat uji gaya angkat rotor.....	32
<b>Gambar 3.12</b> <i>Free body diagram Twin Rotor Hovering System</i> penampang depan .....	33
<b>Gambar 3.13</b> <i>Free body diagram Twin Rotor Hovering System</i> penampang samping .....	34
<b>Gambar 4.1</b> Karakteristik gaya angkat rotor terhadap <i>input</i> sinyal PWM .....	39
<b>Gambar 4.2</b> Perubahan besar arus listrik terhadap <i>input</i> sinyal PWM .....	39
<b>Gambar 4.3</b> Hubungan input sinyal digital pada rotor kanan dan rotor kiri.....	42
<b>Gambar 4.4</b> Hubungan gaya angkat pada rotor kanan dan rotor kiri .....	43
<b>Gambar 4.5</b> <i>Time plot input</i> dan <i>output</i> dengan variasi <i>input</i> pertama .....	45

<b>Gambar 4.6</b> Data <i>input</i> dan <i>output</i> variasi <i>input</i> pertama setelah dilakukan <i>remove means</i> .....	45
<b>Gambar 4.7</b> Data <i>input</i> dan <i>output</i> variasi <i>input</i> pertama yang akan digunakan untuk <i>working data</i> dan <i>validation data</i> .....	46
<b>Gambar 4.8</b> <i>Transient response</i> dari model ARX 8 poles 8 zeros.....	47
<b>Gambar 4.9</b> <i>s-plane</i> untuk model ARX 8 poles 8 zeros.....	48
<b>Gambar 4.10</b> <i>Model output</i> dari hasil simulasi dan data eksperimen.....	49
<b>Gambar 4.11</b> <i>Time plot input</i> dan <i>output</i> dengan variasi <i>input</i> kedua .....	50
<b>Gambar 4.12</b> Data <i>input</i> dan <i>output</i> variasi <i>input</i> kedua setelah dilakukan <i>remove means</i> .....	51
<b>Gambar 4.13</b> Data <i>input</i> dan <i>output</i> variasi <i>input</i> kedua yang akan digunakan untuk <i>working data</i> dan <i>validation data</i> .....	51
<b>Gambar 4.14</b> <i>Transient response</i> dari model ARX 6 poles 6 zeros.....	52
<b>Gambar 4.15</b> <i>s-plane</i> untuk model ARX 6 poles 6 zeros.....	53
<b>Gambar 4.16</b> <i>Model output</i> dari hasil simulasi dan data eksperimen.....	55

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b> Spesifikasi ESC [19] [20] .....	29
<b>Tabel 3.2</b> Spesifikasi Motor Brushless [20].....	30

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang Masalah**

Sistem kontrol atau sistem pengendalian merupakan suatu sistem untuk mengatur variabel masukan agar keluaran dari sistem tersebut sesuai dengan apa yang diinginkan. Pada jurusan Teknik Mesin ITS terdapat mata kuliah yang mempelajari tentang sistem pengendalian. Untuk mendukung proses pembelajaran pada mata kuliah tersebut, diperlukan suatu alat peraga sistem pengendalian. Salah satu mahasiswa Teknik Mesin ITS melakukan penelitian rancang bangun alat peraga sistem pengendalian dengan judul Rancang Bangun Alat dan Sistem Kontrol *Twin Rotor Hovering System* [1].

Sistem pengendalian PID pada *Twin Rotor Hovering System* memerlukan model matematis dari sistem dinamik alat yang akan dikendalikan. Terdapat dua metode untuk mendapatkan model matematis, yaitu dengan cara analisa teoritis dan analisa eksperimen. Analisa teoritis dilakukan dengan membuat persamaan matematis dari alat yang akan dikendalikan. Sedangkan analisa eksperimen, model matematis didapatkan dari proses pengukuran melalui percobaan. Analisa eksperimen ini biasa disebut dengan "*System Identification*".

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang melakukan identifikasi sistem untuk mendapatkan model matematis dari sistem dinamik, diantaranya adalah penelitian oleh D. Schafröth dan Maciej Niedźwiecki. Dalam penelitian D. Schafröth [2], dia melakukan analisa teoritis serta identifikasi sistem untuk mendapatkan model matematis dari sistem dinamik *Coaxial Micro Helicopter* yang kemudian digunakan untuk membuat sistem pengendalian dengan metode *Robust Control*. Sedangkan pada penelitian Maciej Niedźwiecki [3], Maciej melakukan identifikasi sistem untuk mendapatkan model matematis dari sistem dinamik

*Conveyor Belt* agar dapat mengontrol pembebanan dinamik dari benda di atas alat tersebut.

## 1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan penjabaran latar belakang di atas dapat ditarik permasalahan dalam penelitian ini, yaitu bagaimana mencari model matematis dari sistem dinamik *Twin Rotor Hovering System* dengan metode “*System Identification*”. Kualifikasi dalam penelitian ini yang harus dipenuhi antara lain adalah:

- Bagaimana rangkaian sistem *interface* untuk mendukung proses *System Identification* pada *Twin Rotor Hovering System*?
- Bagaimana karakteristik dari gaya angkat rotor dan arus listrik pada ESC terhadap input sinyal PWM?
- Bagaimana cara menampilkan data hasil pengukuran sudut dari *Twin Rotor Hovering System*?
- Bagaimana model dinamis dari *Twin Rotor Hovering System*?

## 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang diangkat dalam penelitian ini adalah mencari model matematis dari sistem dinamik *Twin Rotor Hovering System* dengan metode “Sistem Identifikasi”. Adapun tujuan khusus dari penelitian ini adalah:

- Membuat rangkaian sistem *interface* untuk mendukung proses *System Identification* pada *Twin Rotor Hovering System*.
- Mengetahui karakteristik dari gaya angkat rotor dan arus listrik pada ESC terhadap input PWM
- Menampilkan data hasil pengukuran sudut dari *Twin Rotor Hovering System*.

- Mendapatkan model dinamis dari *Twin Rotor Hovering System*

#### **1.4. Batasan Masalah**

Batasan masalah diperlukan dalam tugas akhir ini guna membuat hasil rancang bangun ini lebih terfokus dan tidak meluas yaitu:

- Menggunakan Arduino sebagai *interface* untuk mendukung proses identifikasi sistem *Twin Rotor Hovering System*.
- Pengaruh keacakan gerak angin sangat kecil karena alat akan diuji coba di dalam ruangan tertutup, sehingga pengaruh angin dapat diabaikan.

#### **1.5. Manfaat Penelitian**

Hasil eksperimen ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai model matematis dari sistem dinamik *Twin Rotor Hovering System*, sehingga dapat digunakan untuk membuat sistem pengendalian dari *Twin Rotor Hovering System*. Diharapkan pula dari eksperimen ini dapat dijadikan referensi mengenai identifikasi sistem serta dapat dijadikan acuan untuk melakukan penelitian-penelitian selanjutnya.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB II

### DASAR TEORI

Dasar teori merupakan landasan awal yang digunakan penulis sebagai dasar pemikiran serta membantu dalam analisa yang berkaitan identifikasi sistem dan perancangan sistem *interface Twin Rotor Hovering System*. Untuk itulah ditulis beberapa dasar teori mengenai hal-hal yang terkait dengan penelitian ini.

#### 2.1. Model Matematis

Model adalah suatu alat yang digunakan untuk menjawab pertanyaan mengenai sistem tanpa harus melakukan eksperimen. Sebagai contoh model dari sifat seseorang bahwa orang itu “baik”. Model ini membantu kita untuk menjawab pertanyaan bagaimana sikap orang tersebut apabila kita meminta bantuan terhadap dia. Secara teknis, model dibuat dengan dasar intuisi dan pengalaman yang disebut dengan *Mental Model*. Sebagai contoh belajar mengendarai mobil, belajar dan pengalaman mengendarai mobil merupakan *mental model* dari *properties* dalam mengendarai mobil. [4]

Jenis lain dari model adalah *Verbal Model*, yaitu perilaku sistem dibawah beberapa kondisi yang berbeda dan dideskripsikan dengan kata-kata. Sebagai contoh apabila suku bunga bank naik, maka tingkat pengangguran juga akan naik. Sistem yang baik dirumuskan dengan *verbal model*. *Mental model* dan *verbal model* merupakan dua hal yang berbeda. Kita menggunakan mental model dari dinamik sepeda ketika kita mengendarai sepeda, dan bukan hal yang mudah untuk merubah model tersebut menjadi *verbal model*. [4]

Sebagai tambahan selain *mental model* dan *verbal model*, terdapat suatu model yang mencoba untuk mencontoh langsung dari sistem. Model itu disebut dengan “*Phyiscal Models*”, yang

digunakan oleh seorang arsitek dan pembuat kapal untuk menguji properti estetika dan hidrodinamika dari sistem kerja pekerjaan mereka masing-masing. Namun model yang akan kita gunakan pada penelitian ini adalah model jenis ke-empat, yaitu "*Mathematical Models*" atau "Model Matematis". Dengan ini berarti bahwa hubungan antara beberapa variabel kuantitas (jarak, arus listrik, aliran, gaya, dan lain-lain) dapat diamati di dalam sistem yang dideskripsikan dengan persamaan matematis sebagai model dari sistem. Semua fenomena di dunia (*real systems*) yang tidak bertentangan hukum alam dapat dimodelkan secara matematis. [4]

Terdapat dua jenis cara untuk membuat model matematis dari *real systems*, yaitu dengan "*Theoretical Modeling*" atau memodelkan secara teoritis dan "*Experimental Modeling*" atau memodelkan secara eksperimen. *Experimental modeling* biasa disebut dengan "*System Identification*" atau identifikasi sistem. Penelitian ini menggunakan metode *system identification* untuk membuat model matematis dari *Twin Rotor Hovering System*. [4]

## **2.2. *System Identification***

*System identification* atau identifikasi sistem adalah metode untuk menentukan model matematis dari sistem dinamik suatu benda berdasarkan pengukuran data yang dilakukan [5]. Prosedur dari identifikasi sistem dilakukan berdasarkan aliran logika secara natural, yaitu: pertama adalah mengumpulkan data masukan dan data keluaran sistem, kemudian memilih model ditampilkan, dan pilihlah model yang paling baik [6].

Terdapat tiga prinsip utama dalam metode identifikasi sistem untuk membuat model matematis, diantaranya:

1. Membuat eksperimen yang tidak rumit dalam proses identifikasi sistem.
2. Membuat model untuk mendeskripsikan keluaran yang bergantung pada masukan pada sistem. Model tersebut tidak

bergantung pada bentuk fisik dari alat yang dianalisa, melainkan sesuatu hal yang terjadi di dalam sistem tersebut.

3. Menggunakan data untuk mengetahui *unknown parameters* dari model yang diperoleh dari *physical modeling*. [4]

Dengan metode identifikasi sistem, kita dapat mengestimasi model matematis dari suatu sistem. Pada penelitian ini, dilakukan identifikasi sistem untuk mengestimasi persamaan *Transfer Function* dari *Twin Rotor Hovering System*.

Proses identifikasi sistem pada penelitian ini menggunakan *System Identification Toolbox* MATLAB yang menyediakan berbagai macam fungsi, diantaranya MATLAB *functions*, *Simulink blocks*, dan aplikasi untuk membuat model matematis dari sistem dinamik dari pengukuran data masukan dan keluaran sistem. Dengan *software* ini, kita dapat menggunakan *time-domain* dan *frequency-domain* dari data masukan dan keluaran untuk mengidentifikasi *continuous-time* dan *discrete-time* dari *transfer function*, *process models*, dan model *state-space*. [6]

## 2.3. *Transfer Function dan State Space*

### 2.3.1. *Transfer Function*

Fungsi alih (*transfer function*) adalah perbandingan antara transformasi *Laplace* keluaran sistem (*output system*) dengan transformasi *Laplace* masukan sistem (*input system*). Fungsi ini dapat merepresentasikan hubungan antara keluaran dan masukan sistem, akan tetapi tidak dapat memberikan informasi mengenai struktur fisik dari sistem. Fungsi alih umumnya digunakan dalam permodelan untuk sistem dengan *single input single output* (SISO).

Misal  $A(s)$  adalah transformasi Laplace masukan, dan  $B(s)$  adalah transformasi Laplace keluaran sistem, seperti pada gambar 2.5, maka fungsi alihnya dituliskan sebagai  $H(s) = \frac{B(s)}{A(s)}$ .



**Gambar 2.1** *Transfer Function*

### 2.3.2. *State Space*

Sistem kendali yang kompleks dengan output dan inputan sistem yang banyak (MIMO) menggunakan state space sebagai representasi modelnya. persamaan *state space* terdiri dari variabel *input*, *state*, dan *output*. Adapun persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

dimana,

$x$  = *state vector*

$\dot{x}$  = penurunan derivatif dari *state vector* terhadap waktu

$y$  = *output vector*

$u$  = *input/control vector*

$A$  = matriks sistem

$B$  = matriks *input*

$C$  = matriks *output*

$D$  = matriks *feedforward*

## 2.4. Pengukuran

Pengukuran adalah suatu kegiatan yang bertujuan untuk menentukan nilai dari suatu besaran dalam bentuk angka (kuantitatif). Dengan kata lain bahwa pengukuran adalah suatu

proses mengaitkan angka secara empirik dan objektif pada sifat-sifat objek atau kejadian nyata sehingga angka yang diperoleh dapat memberikan gambaran yang jelas mengenai objek atau kejadian yang diukur. [7]

Dalam proses pengukuran terdapat faktor-faktor yang menyebabkan kesalahan dalam pengukuran, di antaranya yaitu:

- Kesalahan umum  
Penyebab dari kesalahan ini adalah dari faktor manusia, misalnya kesalahan pada menafsirkan nilai pembagian skala pengukuran. Kesalahan ini dapat dikurangi dengan cara melakukan pengukuran oleh jumlah orang yang banyak kemudian hasil pengukuran tersebut dirata-rata.
- Kesalahan sistematis  
Kesalahan ini terjadi karena faktor sistem pengukuran (alat ukur, metode pengukuran, atau kesalahan manusia). Kesalahan sistematis dapat dikurangi dengan cara kalibrasi terhadap alat ukur, memberikan *training* kepada operator yang menggunakan alat ukur tersebut.
- Kesalahan acak  
Kesalahan seperti ini tidak diketahui penyebabnya dan selalu terjadi kesalahan meskipun semua sumber kesalahan telah diantisipasi.

Pada penelitian ini pengukuran dilakukan guna memperoleh model matematis *Twin Rotor Hovering System* dengan menggunakan metode *System Identification* atau Identifikasi sistem.

## 2.5. Instrumen

Menurut Koes Sulistiadji [7], instrumen adalah alat ukur yang mempunyai sifat kompleks, yang minimal terdiri atas komponen yaitu *transducer* atau sensor, pengondisian sinyal, dan unit keluaran analog. Sensor dipakai untuk menangkap adanya perubahan sinyal, pengondisian sinyal untuk mengubah nilai kekuatan sinyal yang ditangkap, kemudian monitor sebagai

penunjuk pengukuran atau sinyal yang diperoleh. Sedangkan menurut Ibnu Hadjar [8], instrumen merupakan alat ukur yang digunakan untuk mendapatkan informasi kuantitatif tentang variasi karakteristik variabel secara objektif. Dari beberapa pendapat ahli di atas, dapat disimpulkan bahwa instrumen adalah alat ukur yang digunakan untuk mendeteksi suatu perubahan yang kemudian ditunjukkan dalam informasi kuantitatif.

Dalam penelitian ini instrumen berperan sebagai pengukur sudut elevasi serta sudut rotasi dari *Twin Rotor Hovering System*. Komponen instrumen yang digunakan yaitu berupa sensor sebagai penangkap perubahan sinyal, kemudian mikrokontroler sebagai pengubah kekuatan sinyal dan penerus sinyal, serta laptop sebagai monitor sebagai penunjuk pengukuran.

## **2.6. Analog to Digital Conversion (A/D)**

*Analog to Digital Conversion (A/D)* merupakan konversi bentuk sinyal analog menjadi sinyal digital. Sedangkan alat untuk mengkonversi sinyal tersebut adalah ADC (*Analog to Digital Converter*). ADC merupakan pengubah input analog menjadi kode-kode digital yang biasa digunakan sebagai pengatur proses industri, komunikasi digital, dan rangkaian pengukuran/pengujian. Umumnya ADC digunakan sebagai perantara antara sensor yang kebanyakan memiliki output analog dengan sistem komputer seperti sensor suhu, cahaya, tekanan/berat, aliran, posisi dan sebagainya kemudian diukur menggunakan sistem digital (komputer).

ADC (*Analog to Digital Converter*) memiliki dua karakter prinsip, yaitu kecepatan sampling dan resolusi. Kecepatan sampling suatu ADC menyatakan seberapa sering sinyal analog dikonversikan ke bentuk sinyal digital pada selang waktu tertentu. Kecepatan sampling biasanya dinyatakan dalam *Sample per Second (SPS)* [9].

Resolusi ADC menentukan ketelitian nilai hasil konversi ADC. Sebagai contoh: ADC 8 bit akan memiliki output 8 bit data

digital, ini berarti sinyal input dapat dinyatakan dalam 255 ( $2^8 - 1$ ) nilai diskrit. ADC 12 bit memiliki 12 bit output data digital, ini berarti sinyal input dapat dinyatakan dalam 4096 nilai diskrit. Dari contoh di atas, ADC 12 bit akan memberikan ketelitian nilai hasil konversi yang jauh lebih baik daripada ADC 8 bit [9]. Untuk menghitung nilai resolusi suatu sinyal analog menjadi digital yaitu dengan persamaan 2.2.

$$\text{Resolusi} = \frac{V_{in}}{2^n - 1} \dots\dots\dots (2.1)$$

Pada persamaan 2.2 jangkauan input analog mulai dari 0 Volt sampai 5 Volt (skala penuh), dan kemudian dikonversi menjadi ADC 10 bit dengan nilai cacahan resolusi 1023 ( $2^n - 1$ ). Hal ini berarti setiap kenaikan bilangan ADC sebesar 1, maka tegangan analog yang masuk sebesar 4,89 mVolt.

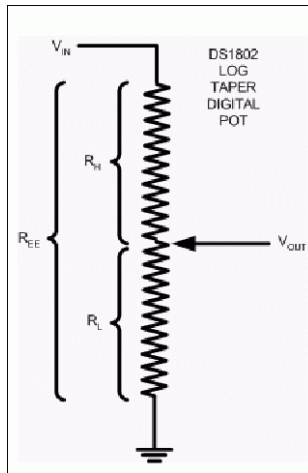
## 2.7. Sensor yang Digunakan

Sensor digunakan untuk menangkap perubahan sinyal dari sistem yang akan diukur. Menurut Arif Wahjudi [10], sensor adalah suatu alat yang melakukan pengukuran awal dan mengubah sebuah variabel menjadi informasi analog elektris atau pneumatis. Sensor juga disebut sebagai transduser, namun sensor merupakan alat pengukuran awal sedangkan transduser merupakan alat yang mengubah suatu sinyal ke bentuk yang lain. Dalam penelitian ini sensor atau transducer yang digunakan adalah Potensiometer.

Potensiometer merupakan salah satu jenis resistor yang berfungsi untuk mengubah sebuah informasi posisi menjadi nilai tegangan. Potensiometer dapat dikatakan sebagai voltage divider karena fungsinya yang dapat mengubah nilai tegangan sesuai dengan komposisi hambatan seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.1, yaitu terdapat tegangan masuk ( $V_{in}$ ) yang kemudian melewati komposisi hambatan yang dapat diatur dengan hambatan bagian atas ( $R_H$ ) dan hambatan bagian bawah ( $R_L$ ). Hasil komposisi

$R_H$  dan  $R_L$  menghasilkan tegangan keluar ( $V_{out}$ ) yang dirumuskan pada

$$V_{out} = V_{in} \cdot \left( \frac{R_L}{R_H + R_L} \right) \dots\dots\dots (2.2)$$



**Gambar 2.2** Potensiometer sebagai sensor posisi [11]

Potensiometer terbagi menjadi dua, yaitu potensiometer putar (*rotary*) dan potensiometer geser (*linear*). Potensiometer putar terdapat jenis *multiple-turn*, yaitu potensiometer yang dapat berputar berkali-kali dan memiliki ketelitian yang tinggi. Karena ketelitian yang sangat tinggi dari potensiometer jenis *multiple-turn*, maka potensiometer tersebut yang digunakan pada penelitian ini.

## 2.8. Arduino

Arduino merupakan suatu perangkat elektronik yang dapat digunakan oleh siapa saja walaupun bagi yang tidak memiliki pengalaman di bidang software maupun elektronik. Dengan



arduino, kita bisa membuat alat yang dapat merespon cahaya, suara, gerakan dan sentuhan. Arduino biasanya digunakan untuk membuat robot, instrumen musik, alarm keamanan, dan lain-lain.

Di dunia pendidikan, arduino juga digunakan sebagai media pembelajaran yang terkait dengan *Control Engineering*. Arduino digunakan karena penggunaannya yang mudah dan terdapat fasilitas pendukung lainnya yang tidak dimiliki produk lain yang serupa.

Arduino terdiri dari perangkat lunak dan perangkat keras. Perangkat lunak arduino atau disebut dengan *sketches* dibuat menggunakan *Arduino integrated development environment* (IDE). Dengan IDE, kita dapat menulis dan memperbaiki kode *interface* dan mengubah kode tersebut menjadi perintah yang dapat dimengerti oleh perangkat keras Arduino (*Arduino board*). Proses transfer kode menggunakan IDE menuju *Arduino board* disebut dengan *uploading*.

*Arduino board* merupakan bagian dari Arduino yang berfungsi mengeksekusi kode yang telah di *upload* dari IDE. *Arduino board* hanya dapat merespon sinyal listrik, jadi *Arduino board* memerlukan komponen tambahan agar dapat berfungsi. Komponen tersebut meliputi sensor yang berfungsi sebagai pengubah segala aspek fisik menjadi sinyal listrik yang dikirimkan ke *Arduino board*, atau aktuator yang berfungsi untuk mengubah sinyal listrik dari *Arduino board* menjadi sesuatu yang dapat mengubah lingkungan sekitar.

Arduino menggunakan mikrokontroler ATmega keluarga AVR. Salah satunya, seri ATmega 328 dengan sejumlah fitur di antaranya *On-Chip System Debug*, *5 Mode Sleep*, 6 saluran ADC yang mendukung reduksi derau, ragam hemat daya (*Power-save Mode*, *Power-down*), dan *Standby Mode* [12].

Mikrokontroler ATmega 328 paling umumnya digunakan pada *board* Arduino seperti UNO, Duomilanove, Nano, dan lain-lain. Sedangkan ATmega 1280 dipakai pada tipe Arduino Mega. Baik ATmega 328 maupun ATmega 1280, keduanya

menggunakan kristal 16 Mhz sebagai pembangkit *clock*. Keduanya juga memiliki blok memori *Flash* untuk penyimpanan instruksi program, SRAM untuk menyimpan variable data sementara, dan EEPROM sebagai media penyimpanan data yang tetap tersimpan meskipun mikrokontroler dalam kondisi tidak tersambung dengan sumber tegangan [12]. Dalam penelitian ini, Arduino digunakan sebagai komponen yang berfungsi untuk mengontrol posisi dari *Twin Rotor Hovering System* serta dapat memberikan *display* pengukuran sudut dalam bentuk grafik.

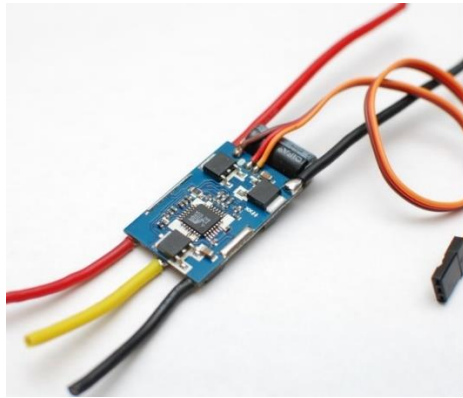
## 2.9. *Electronic Speed Control*

ESC (*Electronic Speed Control*) (Gambar 2.16) merupakan *controller* yang berfungsi untuk mengendalikan kecepatan motor *brushless*. ESC bekerja secara tepat untuk menghidupkan atau mematikan pulsa ke motor, sehingga respon kendali motor berlangsung cepat. Selain itu ESC yang digunakan telah berbasis mikroprosesor, sehingga dapat diprogram sesuai dengan kebutuhan [13].

Cara kerja dari ESC ini adalah dengan mengendalikan kecepatan motor dari hasil pembacaan sinyal yang diterima oleh mikrokontroler. Saat sinyal yang diberikan mikrokontroler dikirimkan ke ESC, sinyal tersebut akan digunakan sebagai perintah untuk mengatur banyaknya arus yang diberikan dari baterai ke motor, agar motor dapat berputar sesuai keinginan pengguna sehingga perputaran lebih efisien. Secara garis besar ESC menerima masukan arus dari DC *power supply* dan mengontrol besar arus output berdasarkan perintah dari mikrokontroler untuk mengatur rpm motor [14].

Pada ESC terdapat beberapa konektor yang memiliki fungsi berbeda. Kabel besar konektor berwarna hitam merah merupakan kabel masukan yang digunakan sebagai penghubung antara ESC dengan *power supply* untuk menyuplai daya menuju ESC. Kabel kecil berwarna coklat, merah dan oranye merupakan konektor keluaran dari ESC menuju modul pemberi sinyal. Kabel kecil

merah berfungsi sebagai VCC, kabel kecil coklat berfungsi sebagai ground sedangkan kabel kecil oranye merupakan kabel receiver, yaitu kabel masukan ESC dari *receiver* yang digunakan sebagai jalan masuknya sinyal yang diberikan oleh mikrokontroler. Sedangkan tiga kabel besar berwarna merah, kuning, dan hitam merupakan kabel keluaran ESC untuk mengontrol kecepatan putar dari motor *brushless*.



**Gambar 2.3** Bentuk fisik dari ESC [15]

Fungsi kerja ESC sangat bergantung pada arus yang digunakan. Jumlah keluaran arus ESC yang digunakan harus lebih besar atau sama dari pada jumlah keluaran arus yang digunakan pada motor, misalnya: ESC mempunyai keluaran 45 ampere, maka keluaran arus motor *brushless* yang digunakan boleh kurang dari 45 ampere. Apabila jumlah keluaran arus pada ESC melebihi 45 ampere tidak terjadi masalah pada kerja motor, karena ampere tersebut masih memenuhi kebutuhan ampere dari motor. Namun hal tersebut berpengaruh pada penggunaan daya *power supply* yang berlebihan pada ESC. Sedangkan penggunaan keluaran arus pada ESC yang kurang, maka yang terjadi adalah ESC akan cepat terbakar karena harus menyuplai tenaga ke motor dengan melebihi batas maksimumnya [14].

### 2.10. Motor Brushless

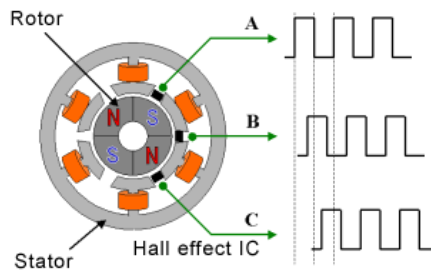
Motor *brushless* merupakan teknologi elektrik terbaru yang memiliki putaran sangat tinggi, rendah konsumsi energi dan tidak mudah panas. Penggunaan motor *brush* sering menimbulkan masalah yaitu ausnya sikat dan timbulnya *electrical noise*. Maka dari itu dikembangkanlah motor DC tanpa sikat atau motor DC *brushless*. Motor DC *brushless* memiliki kelebihan yaitu: efisiensi tinggi, umur yang panjang, konsumsi energi yang kecil dan tidak menimbulkan *electrical noise*. Motor DC *brushless* memiliki beberapa bagian-bagian, bagian tersebut yaitu:

#### 1. Stator

Dasar sebuah stator tiga fasa motor DC *brushless* memiliki tiga gulungan. Kebanyakan motor DC *brushless* jumlah kumparan direplikasi untuk memiliki riak torsi yang lebih kecil.

#### 2. Rotor

Rotor pada motor DC *brushless* (Gambar 2.17) terdiri dari beberapa magnet permanen. Jumlah kutub magnet di rotor juga mempengaruhi ukuran langkah dan riak torsi dari motor. Jumlah kutub yang banyak akan memberikan gerakan presisi dan riak torsi yang kecil. Magnet permanen terdiri dari 1 sampai 5 pasang kutub. Rotor dari motor DC *brushless* lebih ringan dari pada rotor pada motor DC jenis lainnya [14].



**Gambar 2.4** Rotor pada motor DC *brushless* [16]

### 3. Hall Sensor

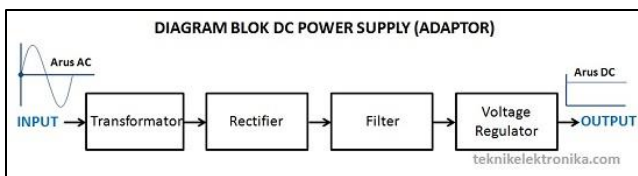
Untuk estimasi posisi rotor, motor DC *brushless* dilengkapi dengan tiga sensor hall yang ditempatkan setiap  $120^\circ$ . Dengan sensor ini ada 6 komutasi yang mungkin berbeda. Fungsi rangkaian kontrol pada motor DC *brushless* selain sebagai pengontrol perpindahan arus, juga sebagai pengarah rotasi rotor. Rangkaian kontrol atau elektronik pada motor DC *brushless* dapat diatur untuk menghasilkan arus berupa gelombang sinus atau persegi [14].

#### 2.11. AC to DC Power Supply

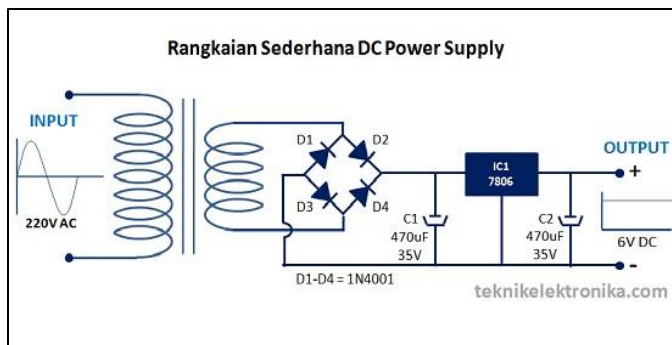
AC to DC *Power Supply*, yaitu DC *Power Supply* yang mengubah sumber tegangan listrik AC menjadi tegangan DC yang dibutuhkan oleh peralatan Elektronika. AC to DC *Power Supply* pada umumnya memiliki sebuah Transformator yang menurunkan tegangan, Dioda sebagai Penyearah dan Kapasitor sebagai Penyaring (Filter) [17]. DC *Power Supply* pada dasarnya memiliki 4 bagian utama agar dapat menghasilkan arus DC yang stabil. Keempat bagian utama tersebut diantaranya adalah Transformer, Rectifier, Filter dan Voltage Regulator [18] (Gambar 2.13).

Berdasarkan hukum ohm bahwa besarnya daya listrik yang dihasilkan ( $P$ ) sebanding dengan tegangan listrik ( $E$ ) dikalikan besar arus yang mengalir ( $I$ ) yang dirumuskan pada persamaan 2.4.

$$P = E \cdot I \dots\dots\dots (2.4)$$



(a)



(b)

**Gambar 2.5** (a) Diagram blok DC Power Supply dan (b) rangkaian sederhana DC Power Supply [18]

## **BAB III**

### **METODOLOGI**

#### **3.1. Diagram Alir Penelitian**

Suatu penelitian yang baik membutuhkan diagram alir yang struktur agar penelitian dapat dijalankan dengan baik. Berikut diagram alir dari penelitian *Twin Rotor Hovering System*:

#### **3.2. Langkah-Langkah Penelitian**

Proses perancangan tugas akhir memerlukan metode yang struktur agar tujuan dari penelitian ini tercapai. Berikut merupakan langkah-langkah dari penelitian ini, yaitu:

##### **1. Studi Literatur dan Lapangan**

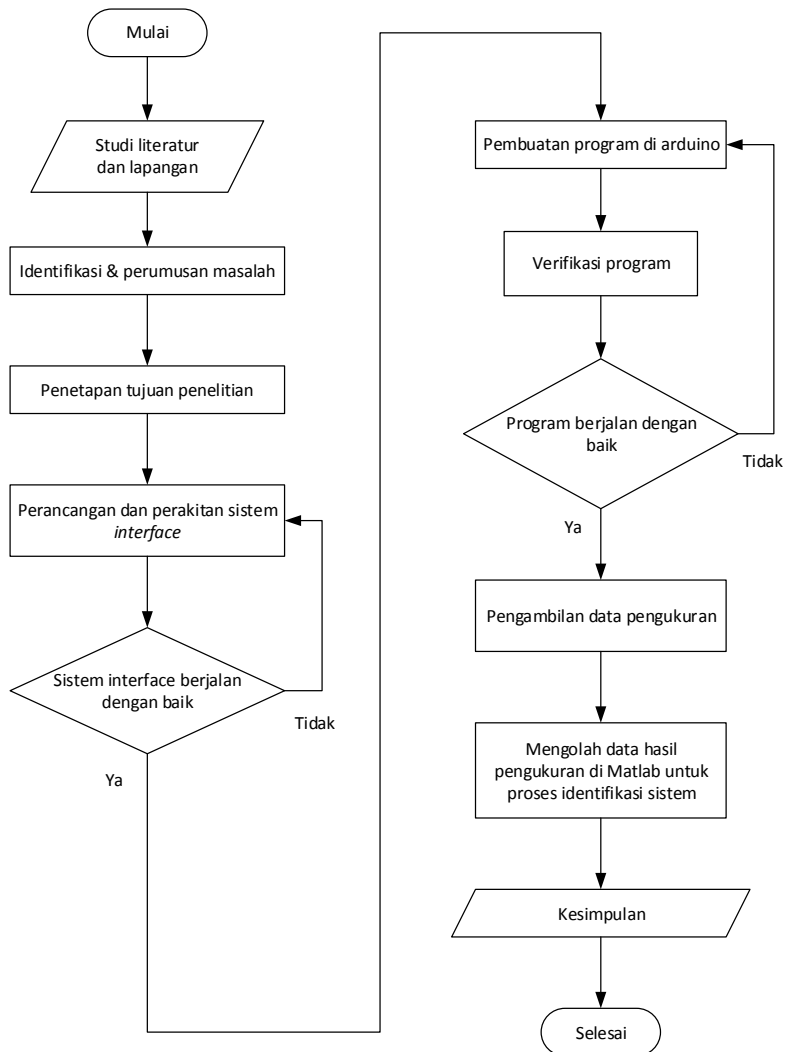
Pada tahap studi literatur dilakukan kajian secara teoritis mengenai pemahaman dasar mengenai sistem instrumen, rangkaian elektronika dan software yang mendukung untuk penyelesaian permasalahan dalam penelitian ini. Studi pustaka yang digunakan diperoleh dari buku, jurnal, internet atau penelitian sebelumnya. Sedangkan studi lapangan dilakukan dengan melakukan kajian terhadap komponen yang digunakan pada penelitian ini.

##### **2. Identifikasi dan Perumusan Masalah**

Perumusan masalah dalam penelitian ini untuk mengidentifikasi permasalahan guna menjawab latar belakang dari penelitian ini. Perumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana cara membuat desain pengukuran *Twin Rotor Hovering System*.

##### **3. Penetapan Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ditetapkan untuk menjawab permasalahan dari penelitian ini, yaitu untuk membuat desain sistem pengukuran posisi *Twin Rotor Hovering System*.

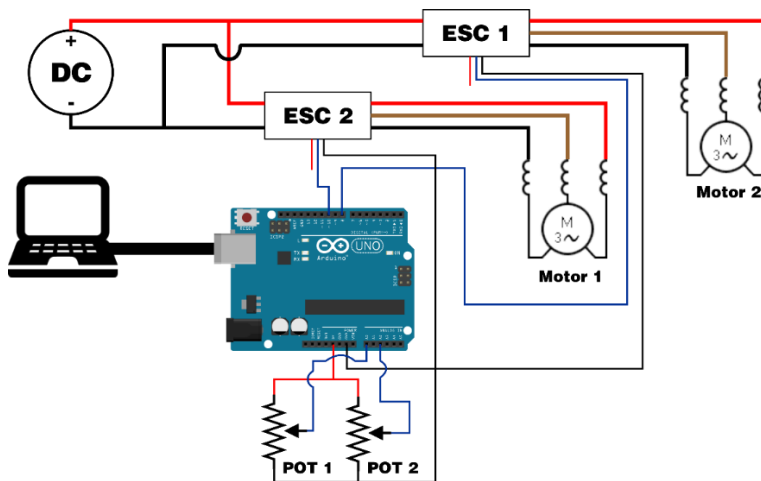


**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian



#### 4. Perancangan dan Perakitan Sistem *Interface*

Setelah melakukan studi literatur dan lapangan, penelitian dilanjutkan dengan perancangan sistem *interface*. Dalam perancangan ini, penulis menentukan komponen-komponen yang akan digunakan sesuai kebutuhan dan spesifikasi. Penulis juga melakukan survei dari komponen-komponen yang tersedia di pasaran dengan melihat *data sheet* serta survei langsung ke suplier untuk menyesuaikan hasil rancangan dengan ketersediaan komponen di lapangan. Pada tahap ini penulis juga merancang *wiring diagram* dari komponen elektronika *Twin Rotor Hovering System*. *Wiring diagram* diilustrasikan pada gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Wiring diagram Twin Rotor Hovering System

Pada gambar 3.2 potensiometer 1 (POT 1) berfungsi sebagai sensor sudut pada *elevation axis*, sedangkan potensiometer 2 (POT 2) berfungsi sebagai sensor sudut pada *travel axis* dari *Twin Rotor Hovering System*. Kemudian

sumber daya Arduino berasal dari port USB yang dihubungkan langsung ke komputer. Port USB tersebut juga berfungsi sebagai media transfer data dari komputer ke Arduino maupun sebaliknya. Lalu sumber daya pada ESC 1 dan ESC 2 didapatkan langsung dari *Power Supply* DC tegangan konstan yang sesuai dengan spesifikasi dari komponen elektronik yang digunakan.

Sistem *interface* dapat dikatakan berjalan dengan baik apabila rotor dapat berputar apabila diberikan input PWM, serta potensiometer dan dapat membaca posisi sudut dengan *sampling time* tertentu. Apabila sistem *interface* tidak dapat melakukan hal tersebut, maka perancangan dan perakitan sistem *interface* harus diperbaiki.

## 5. Pembuatan Program di Arduino

Pembuatan program *Twin Rotor Hovering System* dilakukan dengan *software open-source* Arduino yaitu IDE, yang digunakan untuk menulis dan memperbaiki kode *interface* dan mengubah kode tersebut menjadi perintah yang dapat dimengerti oleh perangkat keras Arduino (*Arduino board*). Perintah tersebut digunakan untuk mengontrol kecepatan motor brushless agar posisi *Twin Rotor Hovering System* sesuai dengan *set point* yang ditetapkan. Berikut ini merupakan program pada *software* Arduino untuk membaca posisi sudut sensor potensiometer:

```
//Inisialisasi Potensiometer
int PotPin = A0;
int reading = 0;

//Inisialisasi Sensor Arus
const int analogIn = A5;
int RawValue= 0;
double Amps = 0;
```

```

void setup(){
    Serial.begin(9600);
}

void loop(){
    reading = analogRead(PotPin);

    RawValue = analogRead(analogIn);
    Amps      =      (float)      (RawValue-
511.5)*40/1023;
    if (RawValue >= 511 && RawValue <= 512)
        Amps = 0;

    Serial.print(Amps, 3);
    Serial.print("  ");
    Serial.print(reading);
    Serial.println("");
    delay(50);
}

```

## 6. Verifikasi Program

Setelah program dibuat, verifikasi terhadap program tersebut dibutuhkan. Apabila program dapat menjalankan sistem seperti apa yang diinginkan maka program sudah berjalan dengan baik. Program yang direncanakan untuk sistem *interface* ini adalah *Twin Rotor Hovering System* dapat diberikan input sinyal PWM dengan pola tertentu serta dapat melakukan pembacaan posisi sudut dengan menggunakan sensor potensiometer.

## 7. Pengambilan Data

Pada tahap ini dilakukan pengambilan data yang dilakukan dua jenis, yaitu data karakteristik gaya angkat rotor (motor *brushless* dan propeler) terhadap input sinyal PWM yang diberikan pada motor *brushless*, lalu pengambilan data pengukuran sudut pada *elevation axis* dan sudut pada *travel axis Twin Rotor Hovering System* terhadap waktu dengan menggunakan arduino yang kemudian data pengukuran disimpan dalam bentuk *text file*. Hasil pengukuran dalam bentuk *text file* agar dapat diproses pada tahap selanjutnya pada penelitian ini.

Pengambilan data pengukuran posisi dilakukan dengan beberapa variasi *input* sinyal PWM, yaitu variasi *input* pertama dengan memberikan sinyal PWM berupa impuls, sedangkan variasi *input* kedua dengan memberikan sinyal PWM berupa impuls yang berulang-ulang.

## 8. Mengolah Data Hasil Pengukuran menggunakan *System Identification Toolbox*

Setelah pengambilan data dilakukan dan telah disimpan dalam bentuk *text file*, kemudian data tersebut diolah dengan *software System Identification Toolbox*. Langkah-langkah identifikasi sistem menggunakan *System Identification Toolbox* adalah menganalisa dan memproses data, menentukan struktur model yang sesuai, mengestimasi parameter dari model, dan memvalidasi akurasi dari model yang didapat.

## 9. Kesimpulan

Pada tahap ini pengambilan kesimpulan akan dilakukan berdasarkan hasil yang didapatkan karakteristik gaya angkat motor *brushless* dan propeler, serta model matematis dari *Twin Rotor Hovering System* yang didapat menggunakan metode “Identifikasi Sistem” dengan *software System Identification Toolbox*.

### 3.3. Diagram Alir Penentuan Spesifikasi *Power Supply*

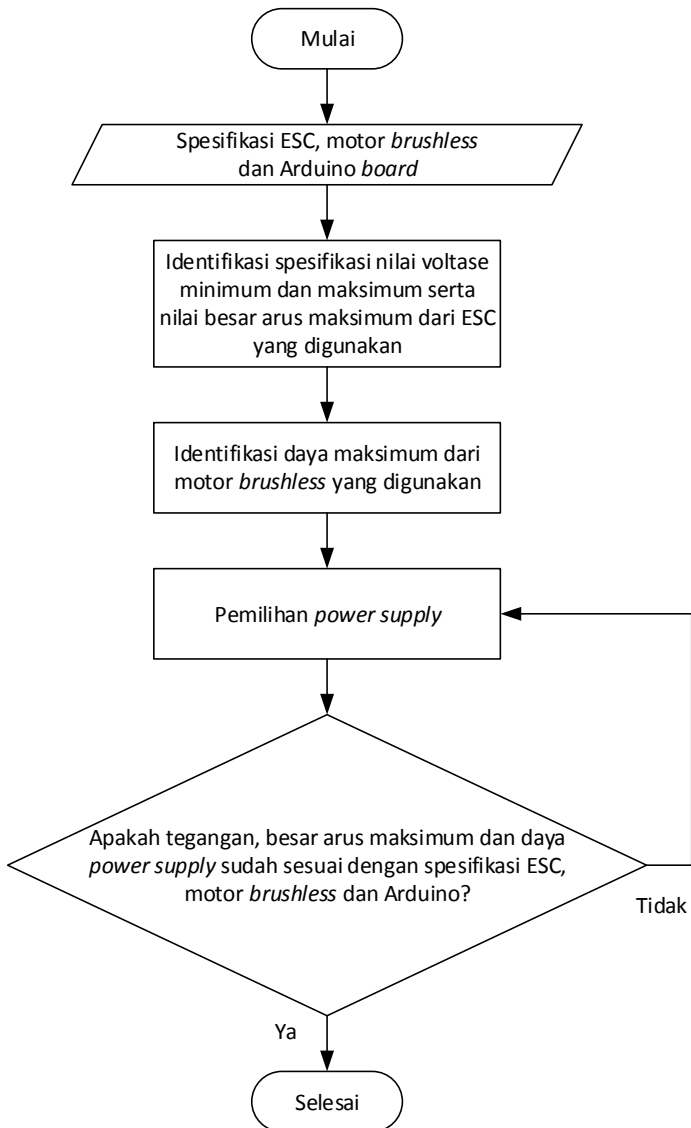
Pemilihan spesifikasi *power supply* untuk *Twin Rotor Hovering System* harus sesuai dengan spesifikasi komponen elektronik yang digunakan yaitu ESC, motor *brushless* dan Arduino agar alat tidak mengalami kerusakan akibat pemilihan *power supply* yang tidak tepat. Diagram alir penentuan spesifikasi *power supply* diilustrasikan pada gambar 3.4.

### 3.4. Diagram Alir Pengambilan Data

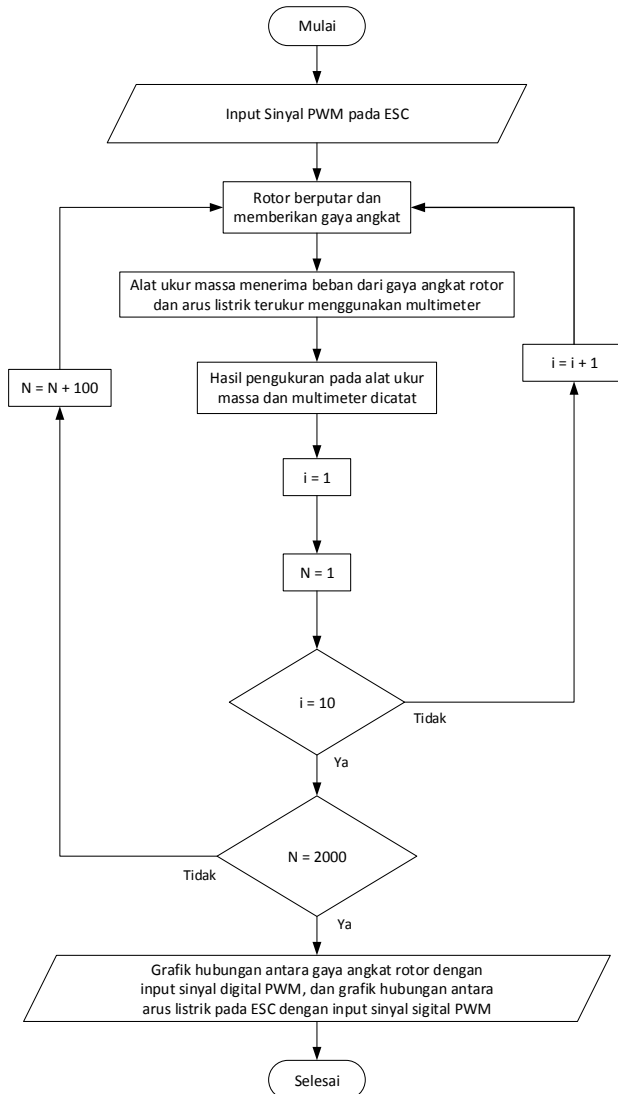
Pada penelitian ini dilakukan dua jenis pengambila data, yaitu pengambilan data karakteristik gaya angkat rotor terhadap kenaikan input arus dan data *textfile* pengukuran posisi *Twin Rotor Hovering System* untuk keperluan identifikasi sistem pada *software System Identification Toolbox*. Diagram alir dari kedua jenis pengambilan data diilustrasikan pada gambar 3.5 dan gambar 3.6. Pada pengambilan data gaya angkat dilakukan pengulangan sebanyak  $i = 10$ , sedangkan input sinyal PWM maksimal yang diberikan pada ESC sebesar  $N = 2000 \text{ microseconds}$ .

### 3.5. Detail Peralatan Uji

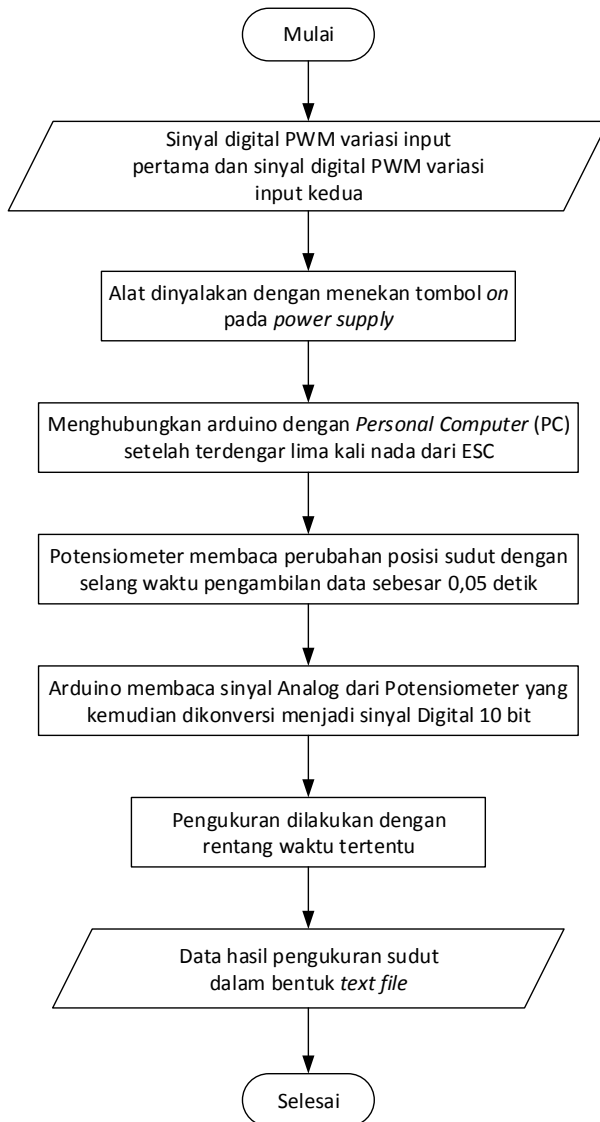
Berdasarkan ilustrasi dari gambar 3.7, POT 1 (Potensiometer 1) berfungsi sebagai sensor untuk membaca sudut pada *elevation axis*, lalu POT 2 (Potensiometer 2) berfungsi sebagai sensor untuk membaca sudut pada *travel axis*. Sedangkan Arduino memiliki fungsi sebagai perintah yang menghubungkan antara input dan output pada Arduino itu sendiri. Kemudian ESC 1 dan ESC 2 menerima perintah langsung dari Arduino. ESC memiliki peran sebagai *driver* motor yang mengatur daya yang masuk ke motor *brushless*.



**Gambar 3.5** Diagram alir pemilihan *power supply*

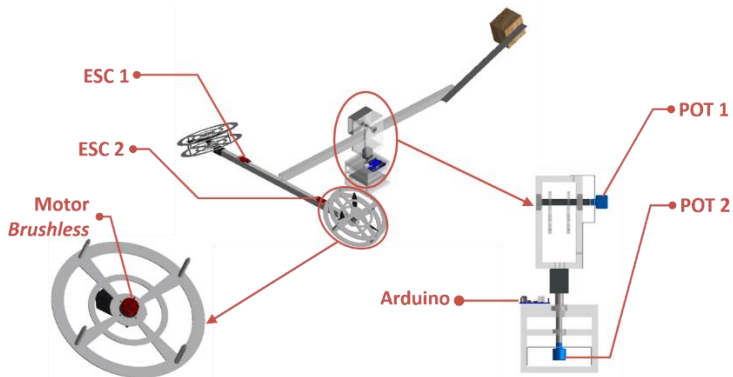


**Gambar 3.6** Diagram alir pengambilan data karakteristik gaya angkat terhadap input arus listrik



**Gambar 3.7** Diagram alir pengambilan data pengukuran sudut *Twin Rotor Hovering System*





**Gambar 3.8** Komponen elektronika yang digunakan pada *Twin Rotor Hovering System*

### 3.6. Spesifikasi ESC

ESC yang digunakan pada desain pengukuran posisi *Twin Rotor Hovering System* yaitu DJI 18A OPTO dengan spesifikasi yang dituliskan pada tabel 3.1. ESC tersebut memiliki input arus maksimal sebesar 18 Ampere, input tegangan yang berkisar antara 11,1 Volt sampai 14,8 Volt dengan frekuensi sinyal input dari modul sebesar 30 – 450 Hz.

**Tabel 3.1** Spesifikasi ESC [19] [20]

<i>Merk</i>	<i>Current</i>	<i>Input Voltage</i>	Frekuensi Sinyal
DJI 18A OPTO	18 A	11,1 - 14,8V	30 – 450 Hz

### 3.7. Spesifikasi Motor *Brushless*

Motor *brushless* yang digunakan sesuai dengan spesifikasi ESC berdasarkan *manual book* DJI. Spesifikasi motor *brushless* yang diperoleh berdasarkan percobaan dari Evan Boldt [20] yang

dituliskan pada tabel 3.2, yaitu dengan nilai putaran per satuan tegangan listrik sebesar 920 kv, tegangan 14,7 Volt, input arus sebesar 15 – 25 Ampere, dan arus maksimal sebesar 30 Ampere.

**Tabel 3.2** Spesifikasi Motor Brushless [20]

<i>Merk</i>	<i>rpm/V</i>	<i>Voltage/Prop</i>	<i>Current</i>	<i>Max Current</i>
DJI 2212/920KV	920 kv	14,7V / 8x4,5	15 – 25 A	30 A

### 3.8. Spesifikasi Potensiometer

Potensiometer yang digunakan pada penelitian ini yaitu Potensiometer *Multiple-Turn* yang diproduksi oleh Vishay, suatu perusahaan Manufaktur Semikonduktor diskrit dan Komponen Pasif. Spesifikasi potensiometer yang digunakan pada penelitian ini dijabarkan pada gambar 3.8.

ELECTRICAL SPECIFICATIONS			
PARAMETER	MODEL 533	MODEL 534	MODEL 535
Resistance range - standard values	50 $\Omega$ to 20 k $\Omega$	100 $\Omega$ to 100 k $\Omega$	50 $\Omega$ to 50 k $\Omega$
Capability range	5 $\Omega$ to 60 k $\Omega$	10 $\Omega$ to 200 k $\Omega$	5 $\Omega$ to 100 k $\Omega$
Standard tolerance	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
Linearity (independent)	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.25\%$
Noise	100 $\Omega$ ENR	100 $\Omega$ ENR	100 $\Omega$ ENR
Rotation (electrical and mechanical)	1080° $\pm 10^\circ$ - 0°	3600° $\pm 10^\circ$ - 0°	1800° $\pm 10^\circ$ - 0°
Power rating (at 70 °C)	1.0 W	2.0 W	1.5 W
Insulation resistance	1000 M $\Omega$ minimum 500 V <sub>DC</sub>		
Dielectric strength	1000 V <sub>RMS</sub> minimum 60 Hz		
Absolute minimum resistance	Not to exceed linearity x total resistance or 1 $\Omega$ , whichever is greater		
Temperature coefficient	20 ppm/°C (standard values, wire only)		
End voltage	0.25 % of total applied voltage, maximum		
Phasing	CCW end points - section 2 phased to section 1 within $\pm 2^\circ$		
Taps	Center tap only		

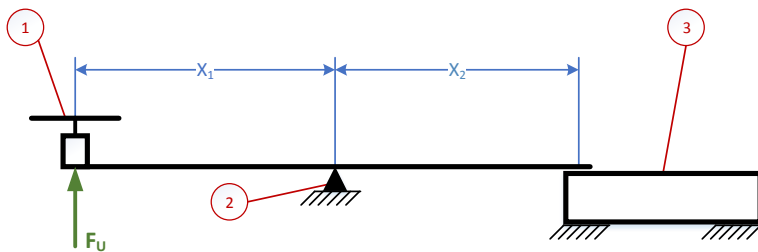
**Gambar 3.9** Spesifikasi potensiometer yang digunakan [21]

Jenis potensiometer Vishay yang digunakan pada penelitian ini adalah Model 534, yaitu dengan spesifikasi hambatan total sebesar 10k $\Omega$  dan rotasi potensiometer sebesar 3600 °. Pada pembacaan nilai ADC dari potensiometer di arduino, potensiometer jenis ini memiliki resolusi pembacaan sebesar 3,5°

berdasarkan perhitungan dari persamaan 2.2 dengan mengganti variabel  $V_{in}$  menjadi sudut potensiometer ( $\theta$ ).

Untuk memperbesar resolusi pembacaan sudut pada sumbu elevasi, dipasangkan gear dengan rasio 4:1. Resolusi pembacaan sudut sumbu elevasi menjadi  $0,88^\circ$  per nilai ADC pada arduino.

### 3.9. Perhitungan Karakteristik Gaya Angkat Rotor

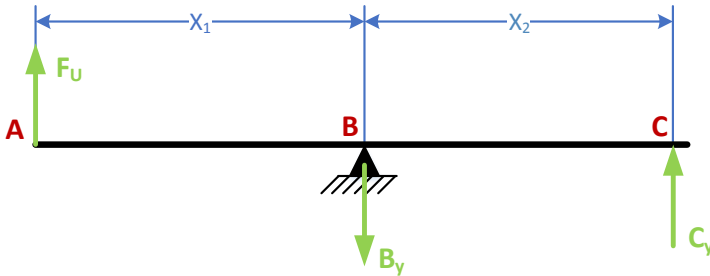


**Gambar 3.10** Mekanisme alat uji pengukur gaya angkat rotor

Untuk mengetahui hubungan antara input sinyal PWM (*microseconds*) pada ESC dengan gaya angkat dari rotor (motor *brushless* dan propeler), dilakukan sebuah percobaan untuk mengukur gaya angkat rotor dengan mekanisme kerja alat percobaan seperti pada gambar 3.10. Keterangan gambar pada nomor 1 merupakan rotor yang memiliki jarak sebesar  $X_1$  dari tumpuan alat uji coba yang diberi keterangan nomor 2. Sedangkan pada jarak  $X_2$  dari tumpuan alat uji coba terdapat alat pengukur massa yang berfungsi sebagai mengukur gaya angkat dari rotor. Alat pengukur massa pada gambar 3.10 diberi keterangan gambar dengan nomor 3.

Untuk menghitung gaya angkat yang terukur pada alat ukur massa dapat menggunakan hukum newton pertama, yaitu suatu objek yang semula diam akan tetap diam dan objek yang semula bergerak akan terus bergerak dengan kecepatan yang sama dan

arah yang sama, kecuali jika objek tersebut dikenakan gaya yang tidak seimbang (*unbalance*). Pada gambar 3.11 gaya angkat rotor direpresentasikan dengan simbol  $F_U$ , untuk gaya reaksi pada tumpuan titik B direpresentasikan dengan simbol  $B_y$ , sedangkan untuk gaya reaksi pada titik C yang akan terukur pada alat pengukur massa direpresentasikan dengan simbol  $C_y$ . Pada alat ukur massa nilai yang terukur adalah massa, oleh karena itu nilai  $C_y$  setara dengan massa yang terukur ( $M_u$ ) dikalikan dengan kecepatan gravitasi bumi ( $g$ ).



**Gambar 3.11** *Free body diagram* alat uji gaya angkat rotor

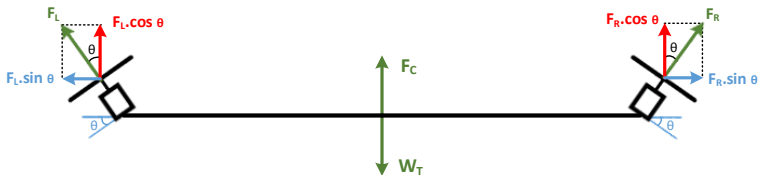
Persamaan yang dibentuk dari FBD gambar 3.11 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \sum M_B &= 0 \\ -F_U X_1 + C_y X_2 &= 0 \\ F_U &= M_u g \frac{X_2}{X_1} \dots\dots\dots (3.1) \end{aligned}$$

### 3.10. *Free Body Diagram Twin Rotor Hovering System*

Dalam penelitian ini, yang membuat *Twin Rotor Hovering System* terangkat adalah gaya angkat rotor dan besarnya momen yang diberikan oleh beban counter weight. Gambar 3.12

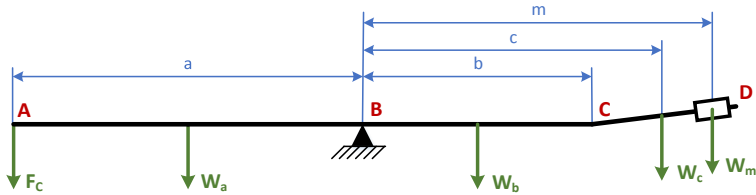
merupakan FBD *Twin Rotor Hovering System* penampang depan, yaitu pada batang depan yang menumpu rotor kanan dan kiri. Gaya angkat rotor kiri direpresentasikan dengan simbol  $F_L$ , sedangkan gaya angkat rotor kanan direpresentasikan dengan simbol  $F_R$ . Karena rotor diletakkan pada batang depan dengan sudut  $\theta$ , maka gaya angkat rotor ke sumbu vertikal (atas) menjadi  $F_R \cos \theta$  dan  $F_L \cos \theta$ . Gaya angkat dari rotor juga menjadi gaya yang bekerja pada sumbu horizontal dengan nilai  $F_R \sin \theta$  dan  $F_L \sin \theta$ . Kemudian berat dari batang depan serta rotor kanan dan kiri direpresentasikan dengan simbol  $W_T$ , sedangkan gaya yang timbul dari momen counter weight direpresentasikan dengan simbol  $F_C$ .



**Gambar 3.12** *Free body diagram Twin Rotor Hovering System* penampang depan

Penampang samping dari *Twin Rotor Hovering System* diilustrasikan dengan gambar 3.13. Batang utama dari *Twin Rotor Hovering System* adalah batang AC, sedangkan batang CD merupakan batang yang digunakan untuk meletakkan beban counter weight. Batang AC memiliki tumpuan pada titik B dengan jarak  $a$  dari titik A dan dengan jarak  $b$  dari titik C. Untuk memudahkan perhitungan, berat dari batang AC dipisahkan menjadi berat pada batang AB dan batang BC. Berat batang AB dengan nilai  $W_a$  memiliki jarak sebesar  $0,5a$  dari titik B, sedangkan berat batang BC dengan nilai  $W_b$  memiliki jarak sebesar  $0,5b$  dari titik B. Untuk batang CD titik beratnya memiliki jarak  $c$  dari titik B dengan nilai berat  $W_c$ , sedangkan posisi beban counter weight

berada pada jarak  $m$  dari titik B dengan nilai berat  $W_m$ . Pada titik A terdapat gaya dengan nilai  $F_C$  merupakan gaya reaksi dari FBD pada gambar 3.12.



**Gambar 3.13** *Free body diagram Twin Rotor Hovering System*  
penampang samping

Berikut ini merupakan persamaan yang dibentuk dari FBD pada gambar 3.12 dan gambar 3.13:

Untuk FBD gambar 3.12

$$\uparrow \sum F_v = 0$$

$$F_R \cos \theta + F_L \cos \theta - W_T + F_C = 0$$

$$F_C = W_T - F_R \cos \theta - F_L \cos \theta \dots\dots\dots(3.2)$$

Untuk FBD gambar 3.13

$$\circlearrowleft \sum M_B = 0$$

$$F_C a + \frac{W_a a}{2} - \frac{W_b b}{2} - W_c c - W_m m = 0$$

Substitusi nilai  $F_C$  dari persamaan (3.2)

$$(W_T - F_R \cos \theta - F_L \cos \theta) a + \frac{W_a a}{2} - \frac{W_b b}{2} - W_c c - W_m m = 0$$

Asumsi  $F_R$  dan  $F_L$  bernilai sama agar tidak ada pergerakan pada *travel axis*, yaitu dengan nilai  $F_R = F_L = F_v$

$$\begin{aligned}
 (W_T - 2F_v \cos \theta)a + \frac{W_a a}{2} - \frac{W_b b}{2} - W_c c - W_m m &= 0 \\
 W_T - 2F_v \cos \theta &= \frac{-0,5 W_a a + 0,5 W_b b + W_c c + W_m m}{a} \\
 -2F_v \cos \theta &= \frac{-0,5 W_a a + 0,5 W_b b + W_c c + W_m m - W_T a}{a} \\
 F_v &= (0,5 W_a a - 0,5 W_b b - W_c c - W_m m + W_T a) \times \\
 (2a \cos \theta)^{-1} &\dots\dots\dots(3.3)
 \end{aligned}$$

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB IV

### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Contoh Perhitungan Uji Coba Gaya Angkat Rotor

Dari gambar 3.11 dapat dilihat bahwa massa yang terukur pada alat ukur massa harus dihitung terlebih dahulu dengan persamaan (3.1), untuk mendapatkan gaya angkat dari rotor. Uji coba ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara masukan sinyal PWM pada ESC (*microseconds*) dengan keluaran gaya angkat rotor. Berikut ini merupakan contoh perhitungan gaya angkat rotor dengan masukan sinyal PWM sebesar 1300 *microseconds* dan keluaran massa yang terukur pada alat ukur massa ( $M_u$ ) yaitu sebesar 89,8 gram (lampiran 5).

Diketahui:

$$X_1 = 22,1 \text{ cm}$$

$$X_2 = 20 \text{ cm}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Perhitungan:

$$F_L = M_u g \frac{X_2}{X_1}$$

$$F_L = 89,8 \text{ gram} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \frac{20 \text{ cm}}{22,1 \text{ cm}} \cdot \left( \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gram}} \right)$$

$$F_L = 0,797 \text{ N}$$

#### 4.2. Analisa Karakteristik Antara Gaya Angkat Rotor Dengan Perubahan *Input* Sinyal Digital ESC

Pada penelitian ini dilakukan analisa karakteristik gaya angkat rotor agar diketahui hubungan *input* sinyal digital ESC

dengan gaya angkat rotor pada *Twin Rotor Hovering System*. Dapat dilihat dari gambar 4.1 respon perubahan gaya angkat rotor dipengaruhi oleh nilai sinyal PWM. Terlihat bahwa grafik tersebut memiliki trendline naik. Saat diberikan *input* sinyal digital sebesar 1200 *microseconds*, maka gaya angkat dari rotor didapatkan sebesar 0,215 N. Untuk input sinyal PWM sebesar 1900 *microseconds*, didapatkan gaya angkat rotor sebesar 3,608 N. Sedangkan pada input sinyal PWM sebesar 2000 *microseconds*, terlihat bahwa tidak terjadi peningkatan gaya angkat yang cukup besar, yaitu dengan nilai gaya angkat 3,649 N. Hal ini mengindikasikan bahwa batas gaya angkat maksimum dari rotor yang digunakan ketika input sinyal PWM yang diberikan sebesar 2000 *microseconds*.

Pendekatan garis trendline yang digunakan pada grafik di gambar 4.1 yaitu menggunakan garis polynomial pangkat dua (order 2) dengan persentase best fits sama dengan 99,5%. Garis trendline tersebut memiliki persamaan sebagai berikut:

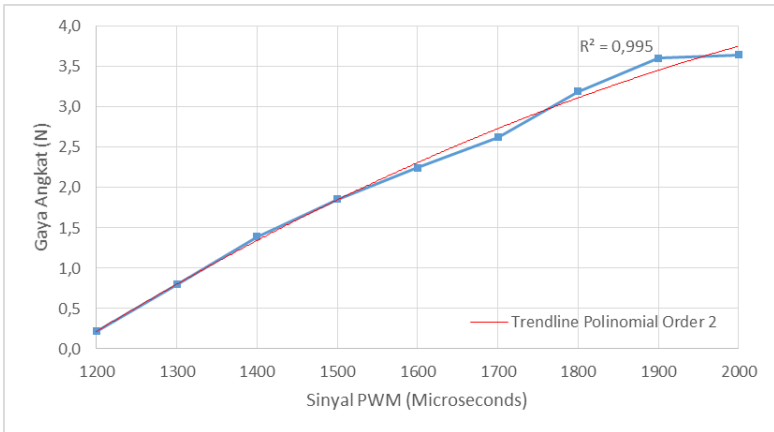
$$y = -2,03 \cdot 10^{-6} x^2 + 0,01092 x - 9,964 \dots \dots \dots (4.1)$$

Dari persamaan (4.1) dapat digunakan untuk mencari besarnya gaya angkat rotor untuk nilai input sinyal digital tertentu.

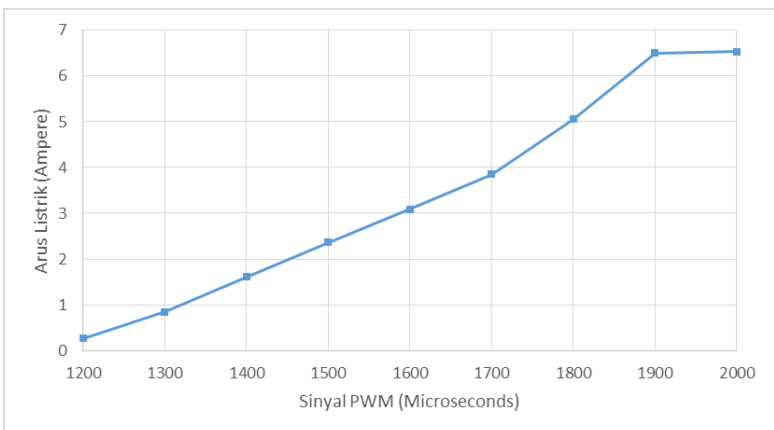
Berdasarkan gambar 4.2 respon perubahan besar arus listrik dipengaruhi oleh *input* sinyal PWM pada ESC. Terlihat bahwa grafik tersebut memiliki trendline naik. Saat diberikan *input* sinyal digital sebesar 1200 *microseconds*, maka besar arus listrik yang terukur yaitu 0,26 A. Untuk *input* sinyal digital sebesar 1900 *microseconds*, didapatkan arus listrik yang terukur sebesar 6,504 A. Sedangkan pada input sinyal digital sebesar 2000 *microseconds*, terlihat bahwa tidak terjadi peningkatan arus listrik yang cukup besar, yaitu dengan nilai arus listrik sebesar 6,532 A. Hal ini mengindikasikan bahwa batas arus listrik maksimum dari rotor yang digunakan ketika input sinyal digital yang diberikan sebesar 2000 *microseconds*.

Dengan semakin besarnya nilai input sinyal digital PWM maka gaya angkat rotor serta besar arus listrik yang masuk juga

semakin besar. Maka dari itu grafik yang didapatkan sudah sesuai dengan teori yang ada.



**Gambar 4.1** Karakteristik gaya angkat rotor terhadap *input* sinyal PWM



**Gambar 4.2** Perubahan besar arus listrik terhadap *input* sinyal PWM

### 4.3. Perhitungan Gaya Angkat *Twin Rotor Hovering System*

Untuk menghitung besar gaya angkat rotor agar momen pada *Twin Rotor Hovering System* seimbang, dapat menggunakan persamaan (3.3) dengan berat batang depan beserta rotor kanan-kiri ( $W_T$ ) sebesar 8,59 N, berat batang AB ( $W_a$ ) sebesar 1,89 N, berat batang BC ( $W_b$ ) sebesar 1,37 N, berat batang CD ( $W_c$ ) sebesar 1,67 N, dan berat beban *counter weight* ( $W_m$ ) sebesar 4,55 N. Untuk variabel jarak yang terdapat pada gambar 3.13 yaitu  $a = 56,5$  cm,  $b = 41,5$  cm,  $c = 50,5$  cm, dan  $m = 73,3$  cm.

Persamaan (3.3) untuk mencari gaya angkat rotor:

$$F_v = (0,5 W_a a - 0,5 W_b b - W_c c - W_m m + W_T a) \times (2a \cos \theta)^{-1}$$

$$F_v = \frac{(0,5 \cdot 1,89 \cdot 56,5 - 0,5 \cdot 1,37 \cdot 42,5 - 1,67 \cdot 50,5 - 4,55 \cdot 73,3 + 8,59 \cdot 56,5)}{2 \cdot 56,5 \cdot \cos 35^\circ}$$

$$F_v = 0,991 \text{ N} \dots\dots\dots(4.2)$$

Jadi, nilai gaya angkat rotor kanan dan kiri secara teoritis harus sebesar 0,991 N. Untuk mendapatkan sistem yang seimbang dengan menggunakan satu rotor, besarnya gaya angkat rotor harus dua kalinya dari perhitungan pada persamaan (4.2), yaitu nilai tersebut sama dengan jumlah gaya angkat rotor kanan dan rotor kiri.

Persamaan (4.1) dapat digunakan untuk mengetahui besar *input* sinyal PWM ESC dengan diketahui gaya angkat sebesar 1,982 N.

Persamaan (4.1) untuk mencari *input* sinyal digital:

$$y = -2,03 \cdot 10^{-6} x^2 + 0,01092 x - 9,964$$

$$-2,03 \cdot 10^{-6} x^2 + 0,01092 x - (9,964 + y) = 0$$

$$\begin{aligned}
 x_{1,2} &= \frac{-b \mp \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \\
 x_{1,2} &= \frac{-0,01092 \mp \sqrt{0,01092^2 - 4(2,03 \cdot 10^{-6})(9,964 + y)}}{2(-2,03 \cdot 10^{-6})} \\
 x_{1,2} &= \frac{-0,01092 \mp \sqrt{0,01092^2 - 4(2,03 \cdot 10^{-6})(9,964 + 1,982)}}{2(-2,03 \cdot 10^{-6})} \\
 x_1 &= 3851 \Rightarrow \text{Tidak memenuhi karena } x \leq 2000 \\
 x_2 &= 1528 \text{ microseconds} \dots \dots \dots (4.3)
 \end{aligned}$$

Dari persamaan (4.3) didapatkan besar input sinyal PWM agar *Twin Rotor Hovering System* seimbang. Hasil perhitungan tersebut akan digunakan sebagai base PWM untuk proses pengendalian.

#### 4.4. *Setting Gaya Angkat Rotor Kanan dan Rotor Kiri*

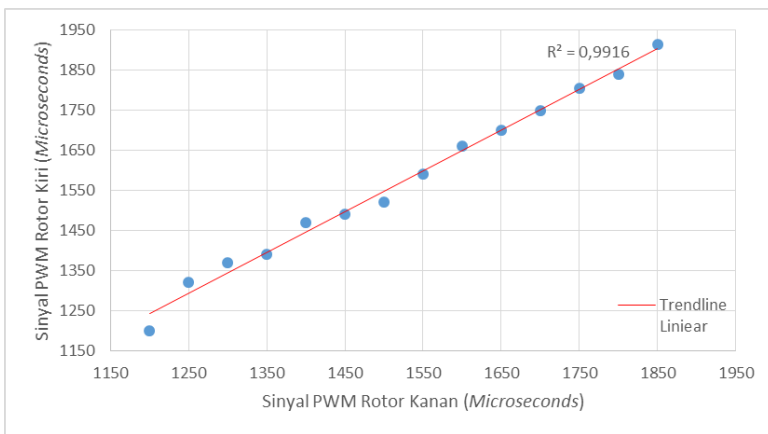
Secara teoritis apabila besar gaya angkat rotor kanan dan rotor kiri bernilai sama, maka tidak akan ada perubahan posisi pada *travel axis*, hal ini dikarenakan besar gaya horizontal yang timbul pada rotor kanan dan rotor kiri akan saling menghilangkan satu sama lain. Namun pada kondisi aktual tidak demikian. Apabila gaya angkat rotor kanan dan kiri sama, akan terjadi perubahan posisi pada *travel axis*. Oleh karena itu dilakukan suatu percobaan untuk mengetahui hubungan *input* sinyal digital rotor kanan dan rotor kiri agar tidak ada perubahan posisi *travel axis* ketika alat sedang dikontrol.

Dari gambar 4.3 dapat dilihat hubungan nilai sinyal digital rotor kanan dan rotor kiri agar *Twin Rotor Hovering System* memiliki momen yang setimbang pada *travel axis*. Terlihat bahwa grafik tersebut memiliki trendline naik. Pada saat rotor kanan diberikan *input* sebesar 1200 *microseconds* didapat *input* sebesar 1200 *microseconds* pada rotor kiri agar momen pada *travel axis* setimbang. Untuk *input* pada rotor kanan sebesar 1250

*microseconds* didapat *input* pada rotor kiri sebesar 1320 *microseconds*, sedangkan untuk *input* pada rotor kanan sebesar 1850 *microseconds* didapat nilai *input* pada rotor kiri sebesar 1915 *microseconds*. Pendekatan garis trendline yang digunakan pada grafik tersebut yaitu menggunakan garis *linier* dengan persentase *best fits* sama dengan 99,16% pada persamaan 4.4.

$$y = 1,0188x + 19,31$$

$$N_L = 1,0188N_R + 19,31 \dots \dots \dots (4.4)$$



**Gambar 4.3** Hubungan input sinyal digital pada rotor kanan dan rotor kiri

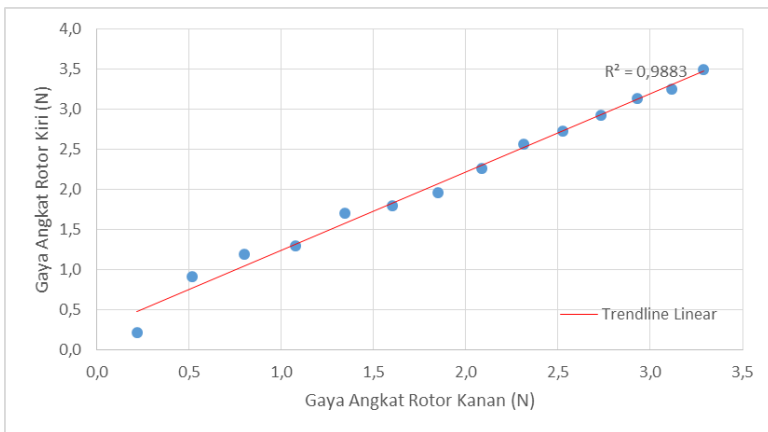
Pada gambar 4.4 juga menunjukkan data hubungan antara rotor kanan dan rotor kiri. Data pada gambar 4.4 didapatkan dari data hubungan input sinyal digital rotor kanan dan rotor kiri yang dihitung dengan persamaan (4.1). Dari gambar 4.4 terlihat bahwa grafik tersebut juga memiliki trendline naik. Pada saat rotor kanan memiliki nilai sebesar 0,217 N didapat nilai pada rotor kiri sebesar 0,217 N. Untuk nilai pada rotor kanan sebesar 0,514 N didapat nilai pada rotor kiri sebesar 0,913 N, sedangkan untuk nilai pada rotor kanan sebesar 3,29 N didapat nilai pada rotor kiri sebesar 3,503 N.

Pendekatan garis trendline yang digunakan yaitu menggunakan garis *linier* dengan persentase *best fits* sama dengan 98,83% pada persamaan 4.5.

$$y = 0,9796x + 0,2569$$

$$F_L = 0,9796F_R + 0,2569 \dots \dots \dots (4.5)$$

Dari persamaan (4.4) dan (4.5) didapatkan persamaan hubungan input sinyal digital dan gaya angkat rotor untuk rotor kanan dan kiri agar tidak ada pergerakan pada *travel axis*. Persamaan tersebut dapat digunakan untuk *setting* base PWM kanan dan kiri dalam proses pengendalian *Twin Rotor Hovering System*.



**Gambar 4.4** Hubungan gaya angkat pada rotor kanan dan rotor kiri

#### 4.5. System Identification

Untuk mengetahui model matematis dari *Twin Rotor Hovering System* dapat menggunakan *software* yaitu *System Identification Toolbox*. Data percobaan untuk simulasi didapatkan dari percobaan yang dilakukan menggunakan dua jenis input pada

alat uji, yang pertama input berupa impuls selama selang waktu tertentu, dan yang kedua diberikan input impuls berulang-ulang.

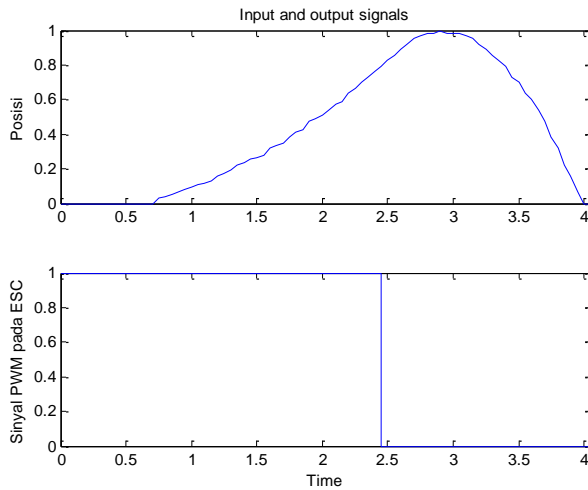
Setelah memasukkan data *input* dan *output* pada *System Identification Toolbox*, kemudian data tersebut diproses menggunakan pendekatan model *Transfer Function* diskrit (ARX) dengan *sampling time* sebesar 0,05 detik. Pendekatan dengan model ARX yang dilakukan dengan variasi jumlah poles dan zeros.

#### **4.5.1. System Identification Menggunakan Variasi Input Pertama**

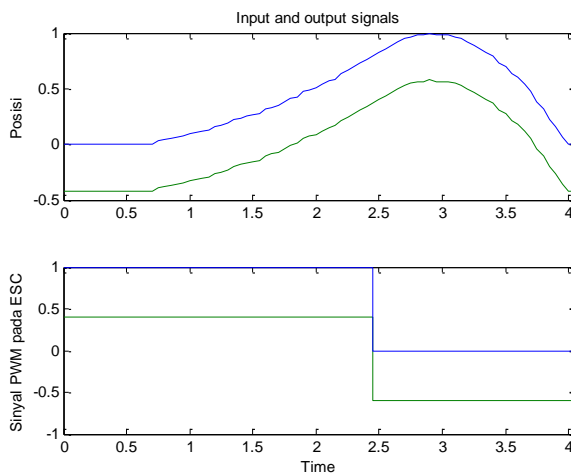
Dari gambar 4.5 terlihat dua grafik *input* sinyal PWM dan *output* posisi sudut elevasi. Besar sinyal PWM yang diberikan pada ESC dari  $t = 0$  sampai  $t = 2,45$  detik yaitu sebesar 1700 *microseconds*. Pada saat  $t = 0,7$  detik alat uji baru mulai terangkat, sedangkan puncak sudut yang terbaca yaitu sebesar  $27,71^\circ$  dari datum (datum pada posisi sudut terbawah alat uji) pada  $t = 2,9$  detik. Kemudian posisi alat uji kembali ke datum saat  $t = 4,05$  detik. Data *input* dan *output* tersebut sudah dinormalisasi dengan jarak data 0 sampai 1.

Sebelum data dipakai untuk simulasi, data tersebut harus diproses terlebih dahulu. Pada *System Identification Toolbox* terdapat kotak dialog *Preprocessing Data*. Pada gambar 4.6 dilakukan *remove means* yang ditunjukkan pada grafik berwarna hijau, yaitu menghilangkan rata-rata pada data agar rata-rata data tersebut menjadi nol. Selanjutnya data dibagi menjadi dua (gambar 4.7), yaitu *working data* garis yang berwarna merah dan *validation data* garis yang berwarna biru muda. *Working data* digunakan untuk simulasi, sedangkan *validation data* digunakan untuk memvalidasi hasil simulasi dengan data hasil eksperimen.

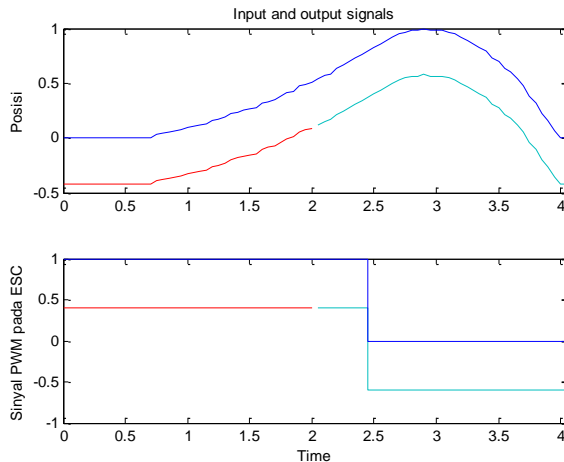




**Gambar 4.5** Time plot input dan output dengan variasi input pertama



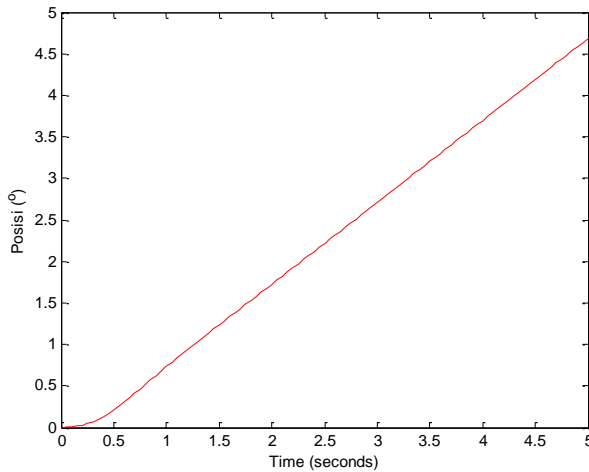
**Gambar 4.6** Data input dan output variasi input pertama setelah dilakukan *remove means*



**Gambar 4.7** Data *input* dan *output* variasi *input* pertama yang akan digunakan untuk *working data* dan *validation data*

Simulasi untuk mendapatkan model ARX dilakukan dengan memvariasikan jumlah poles dan zeros yang dapat dilihat pada lampiran 3. Hasil percobaan simulasi dengan variasi poles dan zeros didapatkan model yang paling cocok dengan *validation model*, yaitu model ARX dengan 8 poles dan 8 zeros. Respon yang didapatkan dari hasil simulasi diilustrasikan pada gambar 4.8. Dari hasil simulasi tersebut didapatkan informasi bahwa posisi sistem akan terus naik.

Untuk mengetahui apakah sistem tersebut stabil dapat dilihat dari *s-plane* pada gambar 4.9. Dari gambar tersebut terlihat 5 poles dan 2 zeros terletak pada *right half plane*, kemudian terdapat 3 poles dan 3 zeros pada *left half plane* serta terdapat 2 zeros tepat pada sumbu imajiner. Karena terdapat poles pada *right half plane*, maka sistem dapat dikatakan tidak stabil.



**Gambar 4.8** *Transient response* dari model ARX 8 poles 8 zeros

Berikut ini merupakan informasi persamaan *transfer function* ARX dengan *sampling time* sebesar 0,05 detik yang didapatkan dari hasil simulasi *System Identification Toolbox*:

Name: tf1

Sample time: 0.05 seconds

Discrete-time identified transfer function.

Parameterization:

Number of poles: 8    Number of zeros: 8

Number of free coefficients: 16

Use "tfddata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:

Termination condition: No improvement along the search direction with line search.

Number of iterations: 18, Number of function evaluations: 514

Estimated using TFEST on time domain data "Identde".

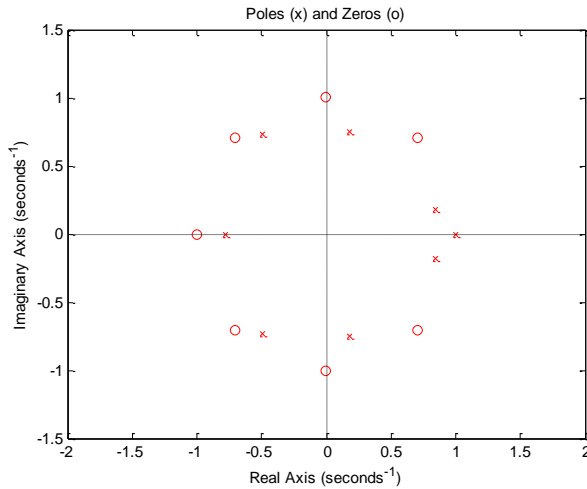
Fit to estimation data: 83.98% (simulation focus)

FPE: 0.001612, MSE: 0.0007059

More information in model's "Report" property.

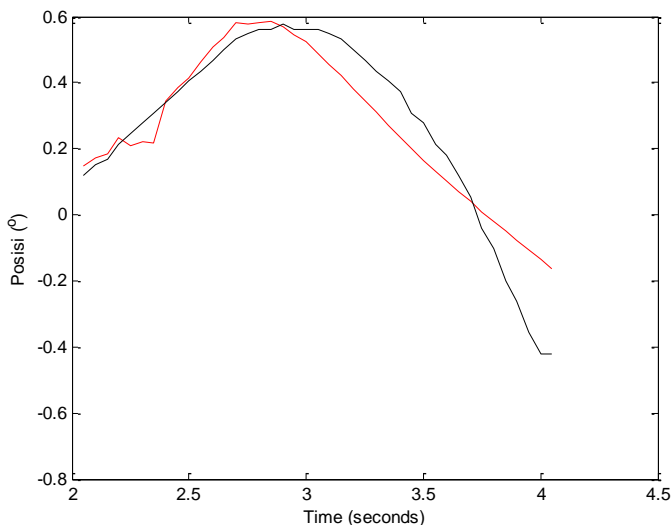
Dari hasil simulasi didapatkan persamaan *transfer function* ARX sebagai berikut:

$$G(z) = \frac{-0,002 z^{-1} + 0,002 z^{-2} + 0,002 z^{-3} + 0,002 z^{-4} + 0,002 z^{-5} + 0,002 z^{-6} + 0,002 z^{-7} + 0,002 z^{-8}}{1 - 1,28 z^{-1} + 0,18 z^{-2} - 0,3 z^{-3} + 0,36 z^{-4} + 0,028 z^{-5} - 0,0795 z^{-6} + 0,36 z^{-7} - 0,27 z^{-8}} \quad (4.6)$$



**Gambar 4.9** *s-plane* untuk model ARX 8 poles 8 zeros

Dari gambar 4.10 dapat kita lihat *model output* dari hasil simulasi *System Identification* dan data eksperimen. Grafik yang berwarna hitam adalah model dari data eksperimen untuk memvalidasi data hasil simulasi. Untuk garis berwarna merah merupakan model simulasi ARX dengan 8 poles dan 8 zeros (TF1). Grafik TF1 memiliki nilai *Best Fits* sebesar 63,26% yang berarti data hasil simulasi memiliki *error* terhadap data eksperimen sebesar 36,74%.



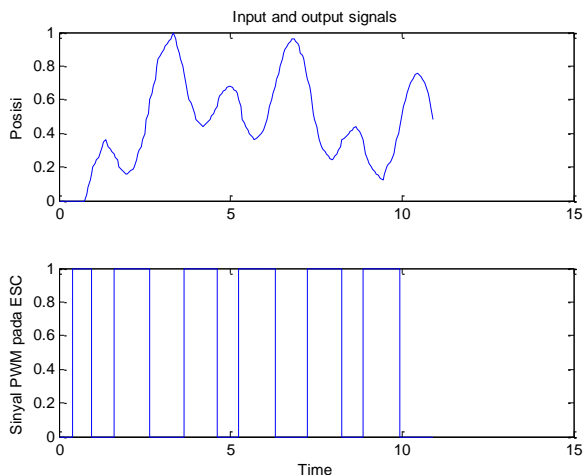
**Gambar 4.10** *Model output* dari hasil simulasi dan data eksperimen

#### 4.5.2. *System Identification* Menggunakan Variasi *Input* Kedua

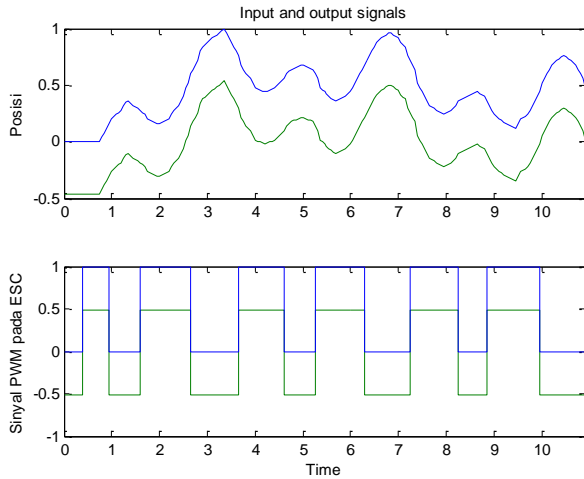
Dari gambar 4.11 terlihat dua grafik *input* sinyal PWM dan *output* posisi sudut elevasi. Sinyal PWM yang diberikan yang diberikan pada ESC secara berulang-ulang yaitu sebesar 1761

*microseconds*. Sudut tertinggi yang terukur pada alat uji yaitu sebesar  $21,99^\circ$  dari datum (datum pada posisi sudut terbawah alat uji) pada  $t = 3,35$  detik. Pengambilan data dilakukan selama rentang waktu 10,9 detik. Data *input* dan *output* tersebut sudah dinormalisasi dengan jarak data 0 sampai 1.

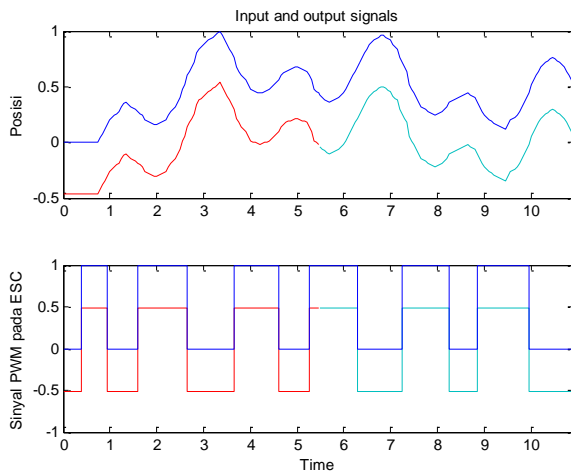
Sebelum data dipakai untuk simulasi, data tersebut harus diproses terlebih dahulu. Pada *System Identification Toolbox* terdapat kotak dialog *Preprocessing Data*. Pada gambar 4.12 dilakukan *remove means* yang ditunjukkan pada grafik berwarna hijau, yaitu menghilangkan rata-rata pada data agar rata-rata data tersebut menjadi nol. Selanjutnya data dibagi menjadi dua (gambar 4.13), yaitu *working data* garis yang berwarna merah dan *validation data* garis yang berwarna biru muda. *Working data* digunakan untuk simulasi, sedangkan *validation data* digunakan untuk memvalidasi hasil simulasi dengan data hasil eksperimen.



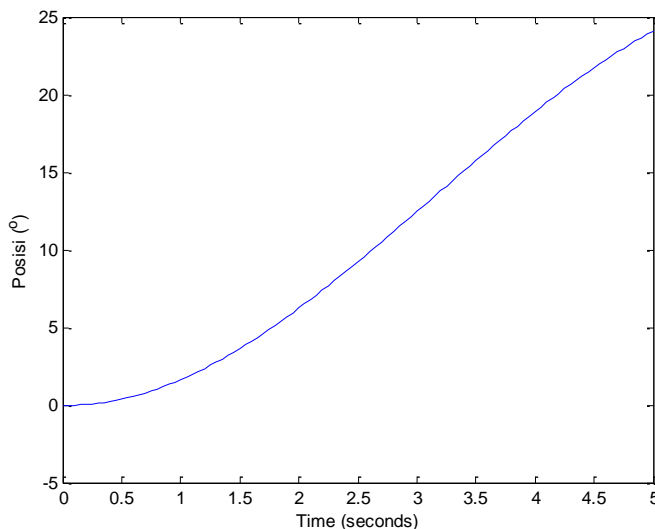
**Gambar 4.11** *Time plot input dan output dengan variasi input kedua*



**Gambar 4.12** Data *input* dan *output* variasi *input* kedua setelah dilakukan *remove means*



**Gambar 4.13** Data *input* dan *output* variasi *input* kedua yang akan digunakan untuk *working data* dan *validation data*

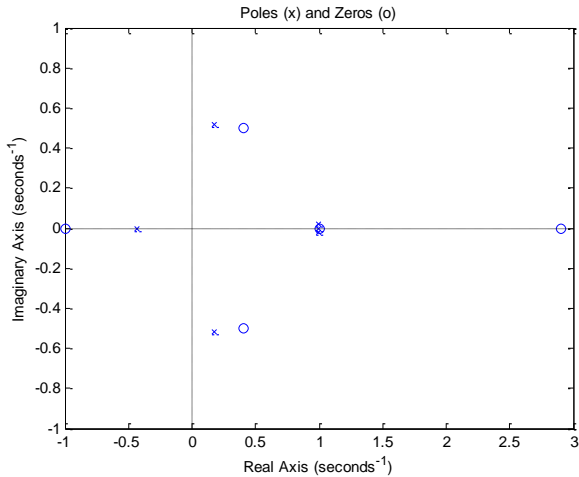


**Gambar 4.14** *Transient response* dari model ARX 6 poles 6 zeros

Simulasi untuk mendapatkan model ARX dilakukan dengan memvariasikan jumlah poles dan zeros yang dapat dilihat pada lampiran 4. Hasil percobaan simulasi dengan variasi poles dan zeros didapatkan model yang paling cocok dengan *validation model*, yaitu model ARX dengan 6 poles dan 6 zeros. Respon yang didapatkan dari hasil simulasi diilustrasikan pada gambar 4.14. Dari hasil simulasi tersebut didapatkan informasi bahwa posisi sistem akan terus naik.

Untuk mengetahui apakah sistem tersebut stabil dapat dilihat dari *s-plane* pada gambar 4.15. Dari gambar tersebut terlihat 5 poles dan 5 zeros terletak pada *right half plane*, kemudian terdapat 1 poles dan 1 zeros pada *left half plane*. Karena terdapat poles pada *right half plane*, maka sistem dapat dikatakan tidak stabil.





**Gambar 4.15** *s-plane* untuk model ARX 6 poles 6 zeros

Berikut ini merupakan informasi persamaan *transfer function* ARX dengan *sampling time* sebesar 0,05 detik yang didapatkan dari hasil simulasi *System Identification Toolbox*:

Name: tf2

Sample time: 0.05 seconds

Discrete-time identified transfer function.

Parameterization:

Number of poles: 6    Number of zeros: 6

Number of free coefficients: 12

Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:

Termination condition: Maximum number of iterations reached.

Number of iterations: 20, Number of function evaluations: 115

Estimated using TFEST on time domain data "Identde".

Fit to estimation data: 94.03% (simulation focus)

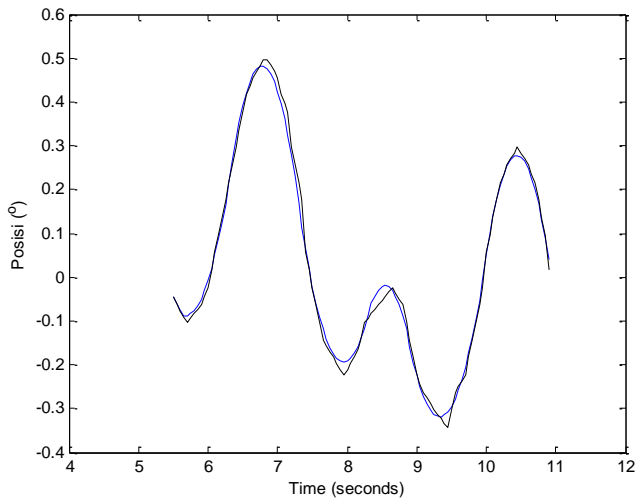
FPE: 0.0002974, MSE: 0.0003041

More information in model's "Report" property.

Dari hasil simulasi didapatkan persamaan *transfer function* ARX sebagai berikut:

$$G(z) = \frac{-0,005782 z^{-1} + 0,02144 z^{-2} - 0,01018 z^{-3} - 0,01438 z^{-4} + 0,01578 z^{-5} - 0,006877 z^{-6}}{1 - 2,903 z^{-1} + 2,865 z^{-2} - 1,038 z^{-3} - 0,03771 z^{-4} + 0,2417 z^{-5} - 0,1287 z^{-6}} \dots\dots\dots (4.6)$$

Dari gambar 4.16 dapat kita lihat *model output* dari hasil simulasi *System Identification* dan data eksperimen. Grafik yang berwarna hitam adalah model dari data eksperimen untuk memvalidasi data hasil simulasi. Untuk garis berwarna biru merupakan model simulasi ARX dengan 6 poles dan 6 zeros (TF2). Grafik TF2 memiliki nilai *Best Fits* sebesar 92,67% yang berarti data hasil simulasi memiliki *error* terhadap data eksperimen sebesar 7,33%.



**Gambar 4.16** *Model output* dari hasil simulasi dan data eksperimen

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## ***Lampiran 1***

Data pengukuran *input* dan *output* data simulasi variasi *input* pertama

No.	ADC Potensiometer	Sudut Elevasi	Input Sinyal Digital
1	0	0	1700
2	0	0	1700
3	0	0	1700
4	0	0	1700
5	0	0	1700
6	0	0	1700
7	0	0	1700
8	0	0	1700
9	0	0	1700
10	0	0	1700
11	0	0	1700
12	0	0	1700
13	0	0	1700
14	0	0	1700
15	0	0	1700
16	1	0,88	1700
17	1	1,17	1700
18	1	1,47	1700
19	2	1,76	1700
20	2	2,2	1700
21	3	2,64	1700
22	3	2,93	1700

23	3	3,23	1700
24	4	3,52	1700
25	5	4,4	1700
26	5	4,84	1700
27	6	5,28	1700
28	7	6,16	1700
29	7	6,6	1700
30	8	7,04	1700
31	8	7,33	1700
32	8	7,63	1700
33	10	8,8	1700
34	10	9,24	1700
35	11	9,68	1700
36	12	10,56	1700
37	13	11,44	1700
38	13	11,88	1700
39	15	13,2	1700
40	15	13,64	1700
41	16	14,08	1700
42	17	14,96	1700
43	18	15,84	1700
44	18	16,28	1700
45	20	17,6	1700
46	21	18,48	1700
47	22	19,35	1700
48	23	20,23	1700
49	24	21,11	1700
50	25	21,99	1150

51	26	22,87	1150
52	27	23,75	1150
53	28	24,63	1150
54	29	25,51	1150
55	30	26,39	1150
56	30	26,83	1150
57	31	27,27	1150
58	31	27,27	1150
59	30	27,71	1150
60	31	27,27	1150
61	31	27,27	1150
62	31	27,27	1150
63	31	26,83	1150
64	30	26,39	1150
65	29	25,51	1150
66	28	24,63	1150
67	27	23,75	1150
68	26	22,87	1150
69	25	21,99	1150
70	23	20,23	1150
71	22	19,35	1150
72	20	17,6	1150
73	19	16,72	1150
74	17	14,96	1150
75	15	13,2	1150
76	12	10,56	1150
77	10	8,8	1150
78	7	6,16	1150

79	5	4,4	1150
80	2	1,76	1150
81	0	0	1150



## ***Lampiran 2***

Data pengukuran *input* dan *output* data simulasi variasi *input* kedua

No.	ADC Potensiometer	Sudut Elevasi	Input Sinyal Digital
1	0	0,00	1150
2	0	0,00	1150
3	0	0,00	1150
4	0	0,00	1150
5	0	0,00	1150
6	0	0,00	1150
7	0	0,00	1150
8	0	0,00	1150
9	0	0,00	1761
10	0	0,00	1761
11	0	0,00	1761
12	0	0,00	1761
13	0	0,00	1761
14	0	0,00	1761
15	0	0,00	1761
16	0	0,00	1761
17	1	0,88	1761
18	2	1,76	1761
19	3	2,64	1761
20	3	3,52	1150
21	5	4,40	1150
22	5	4,84	1150

23	6	5,28	1150
24	7	5,72	1150
25	7	6,16	1150
26	8	7,04	1150
27	9	7,63	1150
28	9	7,92	1150
29	9	7,48	1150
30	8	7,04	1150
31	8	6,75	1150
32	8	6,45	1150
33	7	6,16	1761
34	7	5,72	1761
35	6	5,28	1761
36	5	4,40	1761
37	4	4,18	1761
38	4	3,96	1761
39	4	3,74	1761
40	4	3,52	1761
41	4	3,52	1761
42	4	3,74	1761
43	5	3,96	1761
44	4	4,18	1761
45	5	4,40	1761
46	6	5,28	1761
47	7	6,16	1761
48	7	6,60	1761
49	8	7,04	1761
50	9	7,92	1761

51	10	8,80	1761
52	12	10,56	1761
53	13	11,44	1761
54	15	13,20	1150
55	15	14,08	1150
56	17	14,96	1150
57	18	15,84	1150
58	20	17,60	1150
59	21	18,48	1150
60	21	18,91	1150
61	22	19,35	1150
62	22	19,79	1150
63	23	20,23	1150
64	24	20,52	1150
65	24	20,82	1150
66	24	21,11	1150
67	23	21,55	1150
68	25	21,99	1150
69	23	21,11	1150
70	23	20,23	1150
71	22	19,35	1150
72	21	18,48	1150
73	20	17,60	1150
74	19	16,72	1761
75	17	14,96	1761
76	16	14,08	1761
77	15	13,20	1761
78	15	12,76	1761

79	14	12,32	1761
80	13	11,44	1761
81	12	10,56	1761
82	11	10,34	1761
83	12	10,12	1761
84	11	9,90	1761
85	11	9,68	1761
86	11	9,90	1761
87	11	10,12	1761
88	11	10,34	1761
89	12	10,56	1761
90	12	11,00	1761
91	13	11,44	1761
92	13	11,88	1761
93	14	12,32	1150
94	15	13,20	1150
95	15	13,64	1150
96	16	14,08	1150
97	16	14,30	1150
98	17	14,52	1150
99	16	14,74	1150
100	17	14,96	1150
101	17	14,96	1150
102	17	14,74	1150
103	17	14,52	1150
104	16	14,30	1150
105	15	14,08	1150
106	15	13,20	1761

107	14	12,32	1761
108	12	10,56	1761
109	12	10,12	1761
110	11	9,68	1761
111	11	9,24	1761
112	10	8,80	1761
113	10	8,51	1761
114	9	8,21	1761
115	9	7,92	1761
116	9	8,14	1761
117	10	8,36	1761
118	10	8,58	1761
119	10	8,80	1761
120	10	9,24	1761
121	11	9,68	1761
122	12	10,56	1761
123	13	11,44	1761
124	14	12,32	1761
125	15	13,20	1761
126	16	14,08	1761
127	17	14,96	1150
128	18	15,84	1150
129	20	16,72	1150
130	20	17,60	1150
131	21	18,48	1150
132	22	19,35	1150
133	22	19,79	1150
134	23	20,23	1150

135	23	20,52	1150
136	24	20,82	1150
137	24	21,11	1150
138	24	21,11	1150
139	24	20,82	1150
140	24	20,52	1150
141	23	20,23	1150
142	22	19,35	1150
143	22	18,91	1150
144	21	18,48	1150
145	19	16,72	1150
146	18	15,84	1761
147	17	14,96	1761
148	16	14,08	1761
149	13	11,44	1761
150	12	10,56	1761
151	11	9,68	1761
152	10	8,80	1761
153	9	7,92	1761
154	8	7,04	1761
155	8	6,75	1761
156	7	6,45	1761
157	6	6,16	1761
158	7	5,87	1761
159	6	5,57	1761
160	6	5,28	1761
161	6	5,57	1761
162	7	5,87	1761

163	7	6,16	1761
164	8	6,60	1761
165	8	7,04	1761
166	9	7,92	1150
167	9	8,14	1150
168	10	8,36	1150
169	10	8,58	1150
170	10	8,80	1150
171	11	9,02	1150
172	11	9,24	1150
173	11	9,46	1150
174	11	9,68	1150
175	10	9,39	1150
176	10	9,09	1150
177	10	8,80	1150
178	9	7,92	1761
179	8	7,04	1761
180	7	6,16	1761
181	6	5,28	1761
182	5	4,84	1761
183	5	4,40	1761
184	4	4,11	1761
185	4	3,81	1761
186	4	3,52	1761
187	3	3,30	1761
188	3	3,08	1761
189	3	2,86	1761
190	3	2,64	1761

191	4	3,52	1761
192	5	4,40	1761
193	4	4,69	1761
194	5	4,99	1761
195	6	5,28	1761
196	7	6,16	1761
197	7	7,04	1761
198	9	7,92	1761
199	10	8,80	1761
200	11	9,68	1150
201	13	11,44	1150
202	14	12,32	1150
203	15	13,20	1150
204	15	14,08	1150
205	17	14,96	1150
206	17	15,40	1150
207	18	15,84	1150
208	18	16,13	1150
209	19	16,43	1150
210	19	16,72	1150
211	19	16,43	1150
212	18	16,13	1150
213	18	15,84	1150
214	18	15,40	1150
215	17	14,96	1150
216	16	14,08	1150
217	15	13,20	1150
218	14	12,32	1150



219	12	10,56	1150
-----	----	-------	------

### ***Lampiran 3***

Data variasi poles dan zeros simulasi model ARX dengan variasi *input* pertama

No.	Poles	Zeros	Best Fits	No.	Poles	Zeros	Best Fits
1	2	0	44,73	34	8	0	59,96
2		1	44,27	35		1	60,25
3		2	43,98	36		2	60,53
4	3	0	45,61	37		3	60,89
5		1	45,24	38		4	61,32
6		2	44,63	39		5	61,81
7		3	48,7	40		6	62,31
8	4	0	45,84	41		7	62,81
9		1	45,3	42		8	63,26
10	4	2	44,95	43	9	0	49,29
11		3	44,53	44		1	49,29
12		4	44,05	45		2	49,14
13	5	0	51,48	46		3	48,87
14		1	52,39	47		4	48,54
15		2	52,89	48		5	48,18
16		3	53,54	49		6	47,77
17		4	54,24	50		7	47,3
18	6	5	54,94	51		8	46,72
19		0	52,97	52		9	46,04
20		1	52,76	53	10	0	46,93
21		2	52,57	54		1	49,52
22		3	52,32	55		2	46,93
23		4	51,97	56		3	48,99

24		5	51,53	57		4	48,73
25		6	50,97	58		5	46,52
26	7	0	59,62	59		6	47,99
27		1	59,2	60		7	45,8
28		2	59,49	61		8	45,29
29		3	57,18	62		9	46,23
30		4	57,62	63		10	44,99
31		5	57,75				
32		6	57,61				
33		7	57,28				

### ***Lampiran 4***

Data variasi poles dan zeros simulasi model ARX dengan variasi *input* kedua

No.	Poles	Zeros	Best Fits	No.	Poles	Zeros	Best Fits
1	2	0	20,89	34	8	0	-44,24
2		1	-0,635	35		1	-8,8
3		2	-6,413	36		2	6,42
4	3	0	20,37	37		3	72,75
5		1	-19,05	38		4	6,6
6		2	-3,62	39		5	76,15
7		3	-0,405	40		6	84,7
8	4	0	11,41	41		7	4,48
9		1	-13,02	42	9	8	83,16
10		2	-2,35	43		0	70,29
11		3	71,77	44		1	67,04
12	5	4	72,6	45		2	10,55
13		0	-21,9	46		3	68,02
14		1	-6,06	47		4	20,83
15		2	6,301	48		5	82,31
16		3	2,623	49		6	72,27
17		4	87,51	50		7	74,95
18	6	5	0	51		8	4,233
19		0	18,98	52	10	9	75,35
20		1	12,18	53		0	72,52
21		2	3,425	54		1	15,65
22		3	2,815	55		2	9,027
23		4	2,5	56		3	-9,3

24		5	1,262	57		4	85,52
25		6	92,67	58		5	74,7
26	7	0	-29,77	59		6	84,36
27		1	-20,5	60		7	22,71
28		2	2,523	61		8	91,36
29		3	36,4	62		9	-9,3
30		4	85,94	63		10	63,69
31		5	50,36				
32		6	4,371				
33		7	-23,46				

***Lampiran 5***

Data ujicoba gaya angkat dan arus listrik terhadap *input* sinyal digital

Micro-seconds	Nomor Data	Current (A)	Data Timbangan (gram)	Rata-rata Arus	Rata-rata Data Timbangan
1200	1	0,26	25	0,26	24,2
	2	0,26	24		
	3	0,26	24		
	4	0,26	25		
	5	0,26	24		
	6	0,26	24		
	7	0,26	24		
	8	0,26	24		
	9	0,26	24		
	10	0,26	24		
1300	1	0,85	90	0,847	89,8
	2	0,85	89		
	3	0,84	90		
	4	0,86	90		
	5	0,85	92		
	6	0,84	89		
	7	0,84	88		
	8	0,84	88		
	9	0,85	91		
	10	0,85	91		

1400	1	1,61	155	1,608	156,6
	2	1,61	157		
	3	1,61	156		
	4	1,61	156		
	5	1,61	158		
	6	1,6	157		
	7	1,6	157		
	8	1,61	156		
	9	1,61	156		
	10	1,61	158		
1500	1	2,32	209	2,364	209,1
	2	2,38	210		
	3	2,39	212		
	4	2,32	203		
	5	2,38	210		
	6	2,36	208		
	7	2,37	209		
	8	2,39	211		
	9	2,37	210		
	10	2,36	209		
1600	1	3,11	255	3,082	252,8
	2	3,06	248		
	3	3,08	250		
	4	3,1	256		
	5	3,11	257		
	6	3,06	253		

	7	3,05	255		
	8	3,07	251		
	9	3,1	250		
	10	3,08	253		
1700	1	3,86	298	3,85	295,8
	2	3,85	295		
	3	3,83	296		
	4	3,84	292		
	5	3,86	295		
	6	3,84	293		
	7	3,9	300		
	8	3,81	292		
	9	3,81	295		
	10	3,9	302		
1800	1	5,05	363	5,052	359,9
	2	5,06	366		
	3	5,08	360		
	4	5,04	359		
	5	5,09	362		
	6	5,05	356		
	7	5	354		
	8	5,06	363		
	9	5,03	357		
	10	5,06	359		
1900	1	6,5	405	6,504	406,4
	2	6,49	405		



	3	6,52	413		
	4	6,49	403		
	5	6,47	397		
	6	6,5	404		
	7	6,47	406		
	8	6,51	411		
	9	6,55	408		
	10	6,54	412		
2000	1	6,51	412	6,532	411
	2	6,59	414		
	3	6,53	409		
	4	6,52	407		
	5	6,54	408		
	6	6,54	414		
	7	6,55	419		
	8	6,52	409		
	9	6,5	404		
	10	6,52	414		

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Rancangan sistem *interface* dari *Twin Rotor Hovering System* sudah memenuhi kualifikasi untuk mendukung proses *System Identification*
2. Karakteristik gaya angkat rotor dan arus listrik pada ESC terhadap *input* sinyal PWM telah didapatkan. Persamaan yang didapatkan dari gaya angkat rotor terhadap *input* sinyal PWM dengan pendekatan model polinomial yaitu:

$$y = -2,03 \cdot 10^{-6} x^2 + 0,01092 x - 9,964$$

3. Data hasil pengukuran sudut telah ditampilkan dalam bentuk *text file* dan diolah menggunakan *Microsoft Excel* yang kemudian digunakan untuk proses *System Identification*.
4. Model yang didapatkan dari hasil simulasi *System Identification Toolbox* menggunakan model *Transfer Function* diskrit (ARX) dengan persentase *best fits* sebesar 92,67%. Persamaan dari model tersebut yaitu:

$$G(z) = \frac{-0,005782 z^{-1} + 0,02144 z^{-2} - 0,01018 z^{-3} - 0,01438 z^{-4} + 0,01578 z^{-5} - 0,006877 z^{-6}}{1 - 2,903 z^{-1} + 2,865 z^{-2} - 1,038 z^{-3} - 0,03771 z^{-4} + 0,2417 z^{-5} - 0,1287 z^{-6}}$$

#### 5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk pengembangan dari penelitian ini adalah menggunakan *counter weight* berupa pendulum pada *Twin Rotor Hovering System* agar model matematis dapat dirumuskan secara teoritis yang kemudian dibandingkan dengan hasil pemodelan secara eksperimen.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. E. Nugroho, “Rancang Bangun Alat dan Sistem Kontrol Twin Rotor Hovering System,” 2016.
- [2] D. Schaefroth, C. Bermes, S. Bouabdallah dan R. Siegwart, “Modeling, System Identification and Robust Control of a Coaxial Micro Helicopter,” *Elsevier*, 2010.
- [3] M. Niedźwiecki, M. Meller dan P. Pietrzak, “System Identification based Approach to Dynamic Weighing Revisited,” *Elsevier*, 2016.
- [4] L. Ljung, Modeling of Dynamic Systems, New Jersey: PTR Prentice Hall, 1994.
- [5] L. Ljung, System Identification Toolbox For Use with MATLAB, Math Works, 1997.
- [6] L. Ljung, System Identification: Theory for the User, New Jersey: PTR Prentice Hall, 1987.
- [7] K. Sulistiadji dan J. Pitoyo, Alat Ukur dan Instrumen Ukur, Serpong: BPP Mektan, 2009.
- [8] I. Hadjar, Dasar-dasar Metodologi Penelitian Kwantitatif dalam Pendidikan, Jakarta: Raja Grafindo Persada, 1996.
- [9] D. Hariyanto, “Staff Site Universitas Negeri Yogyakarta,” [Online]. Available: <http://staff.uny.ac.id/sites/default/files/Teknik%20Antarmuka%20-%20ADC.pdf>. [Diakses 13 Mei 2016].
- [10] A. Wahjudi, I. M. L. Batan dan Sutikno, Diktat Pengukuran Teknik, Surabaya: Teknik Mesin ITS.
- [11] “Calculate Ratiometric Outputs,” 3 Maret 2003. [Online]. Available:

- <https://www.maximintegrated.com/en/images/appnotes/234/1902Fig01.gif>. [Diakses 4 April 2016].
- [12] J. E. Istiyanto, Pengantar Elektronika dan Instrumentasi (Pendekatan Project Arduino dan Android), Yogyakarta: Penerbit Andi, 2014.
- [13] “POLSRI REPOSITORY,” [Online]. Available: <http://eprints.polsri.ac.id/108/3/BAB%20II.pdf>. [Diakses 27 Maret 2016].
- [14] Y. D. Rahmawati, 26 Februari 2014. [Online]. Available: <http://digilib.its.ac.id/rancang-bangun-electronic-speed-control-esc-sebagai-pengendali-kecepatan-inline-skate-motorized-30019.html>. [Diakses 4 April 2016].
- [15] “ESC 35A,” 28 May 2012. [Online]. Available: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d1/ESC\\_35A.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d1/ESC_35A.jpg). [Diakses 4 April 2016].
- [16] “Detection of Brushless Motor Rotation,” 12 Juni 2013. [Online]. Available: [https://www.eeweb.com/blog/akm\\_semiconductor/detection-of-brushless-motor-rotation](https://www.eeweb.com/blog/akm_semiconductor/detection-of-brushless-motor-rotation). [Diakses 5 April 2016].
- [17] D. Kho, “Pengertian Power Supply dan Jenis-jenisnya,” 2015. [Online]. Available: <http://teknikelektronika.com/pengertian-power-supply-jenis-catu-daya/>. [Diakses 4 April 2016].
- [18] D. Kho, “Prinsip Kerja DC Power Supply (Adaptor),” 2015. [Online]. Available: <http://teknikelektronika.com/prinsip-kerja-dc-power-supply-adaptor/>. [Diakses 4 April 2016].
- [19] “FlameWheel330 User Manual,” 2010. [Online]. Available: <http://download.dji->

innovations.com/downloads/flamewheel/en/f330\_user\_manual\_v1.2\_en.pdf. [Diakses 25 April 2016].

- [20] E. Boldt, "DJI ESC and Brushless Motor," 13 Mei 2013. [Online]. Available: <http://robotic-controls.com/learn/projects/dji-esc-and-brushless-motor>. [Diakses 25 April 2016].
- [21] Rapid, "Rapid Electronics," 2 April 2014. [Online]. Available: <http://www.rapidonline.com/vishay-534b1103jc-10k-2w-multi-turn-wire-wound-potentiometer-65-1050>. [Diakses 17 Mei 2016].

## BIODATA PENULIS



### **Muhammad Rifqi Fariz**

adalah nama penulis Tugas Akhir ini. Penulis lahir dari orang tua Budy Sosiawan dan Lies Tjahyani sebagai anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis dilahirkan di Jakarta, 4 Desember 1994. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Al-Ikhlas Bekasi (*lulus tahun 2000*), SDN 011 PT Jakarta-Timur (*lulus tahun 2006*), SMPN 81 Jakarta-Timur (*lulus tahun 2009*), dan SMAN 48 Jakarta-Timur (*lulus tahun 2012*). Setelah lulus dari SMAN 48, Penulis

mengikuti SNMPTN Tulis dan diterima di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS pada tahun 2012 dan terdaftar dengan NRP. 2112100130.

Di Jurusan Teknik Mesin ini Penulis mengambil bidang Studi Otomotif. Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan seminar yang diselenggarakan oleh Jurusan dan Institut. Penulis juga aktif di kepanitiaan pada acara yang diselenggarakan oleh Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM). Selain mengikuti kepanitiaan, Penulis juga aktif di organisasi musik yang berada di bawah naungan HMM, yaitu Mesin Music Club (MMC) yang menjabat sebagai pengurus inti. Untuk kegiatan akademik Penulis juga berperan aktif menjadi koordinator praktikum Dinamika Teknik serta menjadi asisten praktikum Mekanika Getaran. Penulis dapat dihubungi melalui email: [rifqi\\_fariz@hotmail.com](mailto:rifqi_fariz@hotmail.com).